

# Festschrift

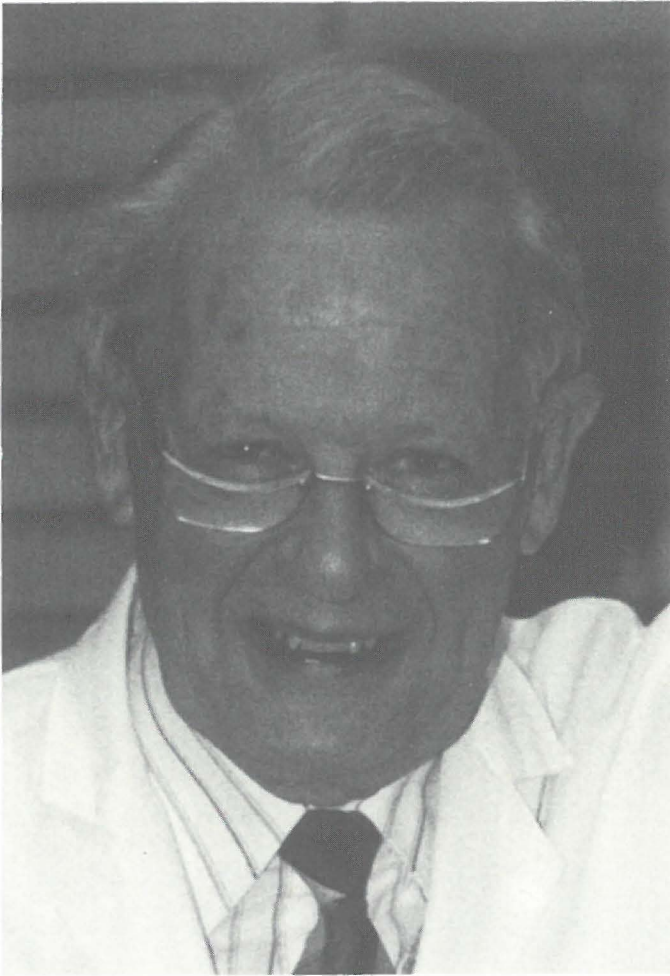
anlässlich der

Emeritierung

von

**Prof. Dr.-Ing. Walter Raab**

Darmstadt im April 1994



Prof. Dr.-Ing. Walter Raab



# Festschrift

anlässlich der

Emeritierung

von

**Prof. Dr.-Ing. Walter Raab**

Darmstadt im April 1994

Herausgegeben von

Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik  
Magdalenenstraße 4  
64289 Darmstadt

Alle Rechte vorbehalten - Printed in Germany



Folgenden Unternehmen wird für ihren Beitrag zur Herstellung dieser Festschrift gedankt:

E. MERCK - Darmstadt  
WELLA AG - Darmstadt  
ARNOLD & STOLZENBERG GMBH - Einbeck

## Inhaltsverzeichnis

Autorenverzeichnis	VII
--------------------	-----

### Grußworte

<i>Helmut Böhme</i> Grußwort	3
<i>Christoph Hars</i> Grußwort	5

### Festvorträge

<i>Gerhard Pahl</i> Würdigung des Fachgebiets Maschinenelemente und Mechanik	11
<i>Arnold Hirchenhain</i> Beanspruchungsgerechte Bauteilgestaltung durch Spannungsoptik	17
<i>Erhard Leidich</i> Berechnung von Welle-Nabe-Verbindungen -Entwicklung der letzten 10 Jahre-	25
<i>Josef Rützel</i> Zum Verhältnis von Fachdisziplin und Berufspädagogik in der Gewerbelehrausbildung	41
<i>Klaus Wolf</i> Die Druckmaschine als informationsverarbeitendes System	45
<i>Uwe Breitmeier</i> Eisenbahntechnik im Wandel der Zeit	51

**Prof. Raab gewidmete Aufsätze der Mitarbeiter  
des Fachgebiets Maschinenelemente und Mechanik**

<b><i>Alfred Neudörfer</i></b> Mechanik und Maschinenelemente in der Gewerbelehrausbildung -Ein didaktisches Konzept-	57
<b><i>Edgar Dörsam</i></b> Ein Vorschlag zur Nomenklatur moderner Kettentriebe	65
<b><i>Volker Günther</i></b> Forschungsthema Paßfederverbindungen an der Technischen Hochschule Darmstadt	75
<b><i>Manfred Kraus</i></b> "Wartungsarme Ketten" -Entwicklungsstand und bisherige Ergebnisse-	81
<b><i>Johannes Hain</i></b> Erkenntnistheorie und Ingenieurwissenschaften	91
<b><i>Peter Fabrig</i></b> Instrumente des Kostenmanagements	103
<b><i>Ulrich Oldendorf</i></b> Ein Diskussionsbeitrag zur Normung der Wellenberechnung	111
<b><i>Ralph Stenger</i></b> Spannungsanalyse mit Hilfe von Spannungsoptik und Finite-Elemente-Methode -ein Vergleich	121

**Verzeichnisse**

<b>Verzeichnis der bisher am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik erstellten Dissertationen</b>	133
<b>Verzeichnis der von Prof. Dr.-Ing. Walter Raab als Korreferent betreuten Dissertationen</b>	135
<b>Verzeichnis der bisherigen Veröffentlichungen des Fachgebietes Maschinenelemente und Mechanik</b>	139
<b>Verzeichnis der bisher am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik erstellten Studien- und Diplomarbeiten</b>	143

## Autorenverzeichnis

**Prof. Dr. phil. Helmut Böhme**

Präsident der Technischen Hochschule Darmstadt

**Uwe Breitmeier,**

Rechtsanwalt und Notar, Leiter des Eisenbahnmuseums Darmstadt-Kranichstein

**Dipl.-Ing. Edgar Dörsam,**

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik der Technischen Hochschule Darmstadt

**Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Fabrig**

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik der Technischen Hochschule Darmstadt

**Dipl.-Wirtsch.-Ing. Volker Günther,**

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik der Technischen Hochschule Darmstadt

**Dipl.-Wirtsch.-Ing. Johannes Hain,**

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik der Technischen Hochschule Darmstadt

**Prof. Dr.-Ing. Christoph Hars**

Dekan des Fachbereichs Maschinenbau, Professor am Fachgebiet Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Hochschule Darmstadt

**Prof. Dr.-Ing. Arnold Hirchenhain,**

Technische Leitung, Mitglied der Geschäftsführung der Gebr. Isringhausen GmbH & Co. KG in Lemgo, Honorarprofessor am Fachbereich Maschinen- und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Clausthal

**Dipl.-Ing. Manfred Kraus,**

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik der Technischen Hochschule Darmstadt

**Prof. Dr.-Ing. Erhard Leidich**

Professor für Konstruktionslehre an der Technischen Universität Chemnitz-Zwickau

**Dr.-Ing. Alfred Neudörfer,**

Akademischer Oberrat am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik der Technischen Hochschule Darmstadt

***Dipl.-Ing. Ulrich Oldendorf,***

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik der  
Technischen Hochschule Darmstadt

***Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Gerhard Pahl,***

Emerit. Professor am Fachgebiet Maschinenelemente und Konstruktionslehre der  
Technischen Hochschule Darmstadt

***Prof. Dr. päd. Josef Rützel***

Dekan des Fachbereichs Erziehungswissenschaften, Psychologie und  
Sportwissenschaften, Professor am Fachgebiet Berufspädagogik der Technischen  
Hochschule Darmstadt

***Dipl.-Ing. Ralph Stenger,***

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik der  
Technischen Hochschule Darmstadt

***Dr.-Ing. Klaus Wolf,***

Bereichsleiter Technik Mechanik der MAN Roland Druckmaschinen AG in  
Offenbach

## **Grußworte**





# Grußwort

von Helmut Böhme

Es zählt zu den schönen und bewahrenswerten akademischen Traditionen, anlässlich einer Emeritierung zu Ehren des Professors, der sich aus der aktiven Lehre zurückzieht, ein Festkolloquium zu veranstalten. Ein solches Kolloquium bietet eine gute Gelegenheit, Wirken und Werk des betreffenden Hochschullehrers und Forschers zu würdigen. Aus verschiedenen Blickwinkeln können sein Beitrag für die Hochschule allgemein und sein Engagement für die Ausbildung des akademischen Nachwuchses im besonderen, können die wissenschaftlichen Leistungen zusammenfassend vorgestellt werden. Es ist auch der rechte Zeitpunkt, ihm zu danken für seine Verdienste um Forschung und Lehre und um die akademische Selbstverwaltung.

So ist es denn auch mit Nachdruck zu begrüßen, daß Kollegen und Schüler die Emeritierung Professor Dr.-Ing. Walter Raabs zum willkommenen Anlaß nahmen, für ihn ein Festkolloquium vorzubereiten. Walter Raab ist der Technischen Hochschule Darmstadt seit langem eng verbunden. Der gebürtige Darmstädter, der seine Jugend- und Schuljahre in Berlin verbrachte, hat an ihr Anfang der 50er Jahre sein Maschinenbaustudium absolviert, war nach dem Diplomexamen, das er 1954 ablegte, noch bis zu seiner Promotion 1961 Wissenschaftlicher Assistent an der damaligen Fakultät für Maschinenbau. Dann begann er eine erfolgreiche Karriere in der Industrie. Nach einem kurzen Abstecher als Dozent für Maschinenelemente und Konstruktion an der Staatlichen Ingenieurschule Osnabrück nahm er 1965 einen Ruf auf den neuen Lehrstuhl für Maschinenelemente und Mechanik an unserer Hochschule an.

Die Errichtung des neuen Lehrstuhls, später im Zuge der Hochschulgesetzgebung in Fachgebiet umbenannt, geschah in erster Linie vor dem Hintergrund der Tatsache, daß man in Hessen spezielle Ausbildungskonzepte im ingenieurwissenschaftlichen Bereich für Gewerbelehrer anstrebte. Bis in unsere Tage ist das Fachgebiet von dieser Zielsetzung geprägt geblieben, wenn auch natürlich nicht ausschließlich. Manche sprechen direkt von einem "Dienstleistungsfachgebiet", eine, wie ich meine durchaus positive und anerkennende Bezeichnung.

Professor Raab betreute jedoch nicht nur angehende Gewerbelehrer, sondern auch Studierende der Elektrotechnik und des Wirtschaftsingenieurwesens, die das Diplom als Abschluß gewählt hatten. Sie erhielten bei ihm die konstruktive Grundausbildung mit den Schwerpunkten Darstellung und Gestaltung. Die wenigen Sätze können nur andeuten, welche großen Lehrverpflichtungen Kollege Raab erfüllte. Man darf dabei auch nicht vergessen, daß die zurückliegenden Jahre durch eine ganz erhebliche Überlast infolge der gewaltig angestiegenen Studentenzahlen gekennzeichnet waren. Besondere Verantwortung übernahm er auch als Dekan seines Fachbereichs. Professor Raab hat sich all diesen Belastungen stets gestellt, dafür schuldet ihm die Hochschule Dank.

Nach diesem kurzen Rückblick auf die umfangreiche Lehrtätigkeit Walter Raabs müßte man fast fragen: Ja, hat er dabei überhaupt noch Zeit gehabt für die Forschung? Nun, wie er es gemacht hat, weiß ich nicht, aber irgendwie hat er diese Zeit dennoch gefunden. Das dokumentieren seine zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Untersuchungen aus den Bereichen Antriebstechnik, Konstruktionssystematik und Wellen-Naben-Verbindungen und vor allem Spannungsoptik, mit der er sich schon in seiner Diplomarbeit befaßte, waren die Themen. Im einzelnen mögen das Berufenere würdigen. Den guten Ruf, den Walter Raab in der Fachwelt, der scientific community, genießt, belegen nicht zuletzt die Namen der Referenten dieses Festkolloquiums. Auch die über 20 Dissertationen, die aus seinem Fachgebiet hervorgegangen sind, muß man hier erwähnen.

Dem "frischgebackenen" Emeritus unserer Technischen Hochschule wünsche ich für die kommenden Jahre Gesundheit und schlicht und einfach Freude an einem vom Alltagsstreß befreiten Leben, zum Beispiel bei der Beschäftigung mit seinen Steckenpferden wie die Geschichte des Eisenbahnwesens und klassischer Musik. Sein Fachgebiet, das noch unter seiner Ägide in Mechatronische Systeme im Maschinenbau umbenannt wurde, hat Walter Raab jedenfalls für dessen weitere Zukunft gut vorbereitet.

# Grußwort

von Christoph Hars

Professor Dr.-Ing. Walter Raab ist gebürtiger Darmstädter. Am 23. März 1929 kam er in dieser Stadt zur Welt, in der er bis auf wenige Jahre auch seine gesamte berufliche Laufbahn durchlaufen sollte. Die längste Zeit außerhalb Darmstadts betraf das jugendliche Alter zwischen fünf und fünfzehn Jahren, die in Berlin verbracht wurden. Im Gefolge der schweren Kriegszerstörungen kehrte die Familie Raab 1944 - ausgebombt in Berlin - nach Darmstadt zurück. Hier sollte der Sechzehnjährige noch zum Arbeitsdienst eingezogen werden, aber die Besetzung durch die Amerikaner kam dem einen Tag zuvor. 1948 folgt das Abitur, und es schließen sich verschiedene Praktika in mehreren Arbeitsstätten an. Träumte, wie es heißt, der Knabe von einem Beruf als Schiffssingenieur oder einer Tätigkeit in der Forstwirtschaft - beides Berufe, hinter denen vielleicht das Fernziel stand, dem zerstörerischen Trubel einer kriegsbetroffenen Stadt zu entfliehen -, so finden Jugendträume und Realitätssinn zusammen in dem Wunsch, Maschinenbau zu studieren. 1949 beginnt Prof. Raab mit dem Studium an der Technischen Hochschule Darmstadt, und jeder, der die Bilder jener Tage in seinem Gedächtnis trägt, kann sich die schwierigen Rahmenbedingungen eines Studiums in jener Zeit ausmalen. Im Jahre 1949 beteiligten sich die Studenten am Aufbau der Hochschule. Als das Winter-Semester 1949/50 begann, war die Bundesrepublik Deutschland gerade wenige Wochen alt. Wir hatten einen Bundespräsidenten und einen Bundeskanzler. Diese unterstanden jedoch den drei Hohen Kommissaren der westlichen Alliierten.

1954 folgt das Diplom. Es ist ein verregneter Sommer 1954; man sprach erstmals von einem Wirtschaftswunder in der Bundesrepublik Deutschland. Die Bundesrepublik Deutschland wurde Fußballweltmeister, und Mercedes Benz siegte erstmals mit den neuen, noch vollverkleideten Silberpfeil-Rennwagen in dem 24-Stunden-Rennen von Le Mans. Kälte und Regen des Sommers 1954 führten jedoch auch zum Zusammenbruch der bundesdeutschen Motorradindustrie, die in den wenigen Jahren seit der Währungsreform 1948 außerordentlich kreativ und erfolgreich war. Die 250er Rennmax von NSU schickte sich an, nicht nur in ihrer Klasse, sondern auch in der nächst höheren, der 350er Klasse, die bis dahin von den Italienern mit der Moto Guzzi beherrscht war, Weltmeister zu werden. Einige Motorrad- und Motorroller-Hersteller retteten sich über den verregneten Sommer 1954 in Kleinwagen, und der berühmteste Neuling im Fahrzeugbau war sicherlich die Hans Glas GmbH mit dem Goggomobil, ein kleines Unternehmen, das ursprünglich landwirtschaftliche Geräte herstellte, sich über einen ersten großvolumig verkleideten Motorroller zu Beginn der fünfziger Jahre und über das Goggomobil zu Mitte der fünfziger Jahre zum Ende dieses Jahrzehnts auch erfolgreich zu einem Hersteller von kleinen Sportcoupes und zuletzt sogar auch eines viertürigen Mittelklassewagens entwickelt hatte. Dieses Unternehmen ist in die Annalen des Automobilbaus eingegangen, denn meines Wissens hat es erstmals den Zahnriemen zum Antrieb der Nockenwelle im Ottomotor eingesetzt. Der Zahnriemen - ein neues Maschinenelement wurde populär. Später hat BMW das Werk des Goggomobils übernommen und damit langfristig eine beeindruckende Pionierleistung der fünfziger Jahre abgesichert. Das Examensjahr unseres Kollegen Raab erbrachte noch weitere weithin anerkannte Leistungen der jungen bundesdeutschen

Nachkriegsindustrie. 1954 kam Borgward mit der berühmten Isabella auf den Markt. Die im Jahr 1953 neugegründete Lufthansa unternahm erste zaghafte Schritte. Neu eingerichtete internationale Flugverbindungen wurden in der Presse ausführlich vermerkt. Die bundesdeutsche Kameraindustrie war in Vielfalt und Qualität weltführend. 1956 konnten die berühmten und der Welt ältesten optischen Werke Voigtländer in Braunschweig auf eine 200jährige Firmengeschichte zurückblicken.

Bereits seit 1953 war Prof. Raab Hilfsassistent am Institut für Maschinenelemente, das seinerzeit unter der Leitung von Prof. Titschack stand. Nach dem erfolgreichen Abschluß des Studiums wurde hier Prof. Raab auch wissenschaftlicher Assistent, und er bekleidete dieses Amt bis 1961, dem geschichtsträchtigen Jahr des Berliner Mauerbaus, in dem Prof. Raab mit einer Arbeit zum Thema "Sonderprobleme bei spannungsoptischen Untersuchungen von Maschinenteilen" zum Dr.-Ing. promoviert wurde. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter beschäftigte sich Prof. Raab nicht nur mit seiner eigenständigen Arbeit, sondern er wirkte auch mit in der Lehre und war vor allem auch an der Planung des Neubaus Magdalenenstraße 4 beteiligt. Im Anschluß an die Promotion geht Prof. Raab für drei Jahre in die Industrie. Er wird Bereichsingenieur für Zentralforschung Vollsynthese der Vereinigten Glanzstoff-Fabriken AG Wuppertal im Werk Obernburg am Main, knapp 40 km östlich von Darmstadt gelegen.

Aber schon 1965 zieht es Prof. Raab zurück in die Lehre. An der neugegründeten ehemaligen Staatlichen Ingenieurschule in Osnabrück wird er Dozent und vertritt das Gebiet Maschinenelemente. Beratend bleibt er tätig für die Vereinigten Glanzstoff-Fabriken. Doch kaum war der Schritt nach Osnabrück vollzogen, erhält Prof. Raab im Jahre 1965 den Ruf an die Technische Hochschule Darmstadt, in der Fakultät Maschinenbau die Leitung des neugegründeten Lehrstuhls "Maschinenelemente und Mechanik" zu übernehmen. Am 1. März 1966 wird die neue Tätigkeit angetreten, obwohl - wie aus einem Schriftwechsel hervorgeht - der Lehrstuhl anfangs über keinerlei Räumlichkeiten verfügt. Aber offensichtlich das Problem konnte gelöst werden, und Prof. Raab bleibt seiner neuen Aufgabe exakt 28 Jahre und einen Monat bis zur Emeritierung am 31. März dieses Jahres treu. In der Lehre wird die Aufgabe übernommen, insbesondere die angehenden Gewerbelehrer auszubilden, aber auch die Studenten der Elektrotechnik in das Gebiet der Maschinenelemente einzuführen. Es wird auch umfangreiche Forschung betrieben. Der Schwerpunkt liegt im Bereich der allgemeinen Konstruktionsmethodik und schlägt sich nieder in 11 Dissertationen, die Prof. Raab wissenschaftlich leitet und betreut. Darüber hinaus beschäftigt sich Prof. Raab mit Maschinenelementen der Antriebsübertragung. Eine Dissertation betrifft den Flachriemen, zwei gelten der Rollenkette, vier den Wellen-Naben-Verbindungen, und zur Zeit laufen noch vier Forschungsvorhaben in engem Kontakt mit der Industrie.

Umfangreich ist auch die Liste der Veröffentlichungen, die das Fachgebiet "Maschinenelemente und Mechanik" unter der Leitung von Prof. Raab erarbeitet. Hier stehen die Konstruktionsmethodik mit elf und die Antriebstechnik mit ihren Untergebieten Flachriemen und Kettenantriebe mit insgesamt zehn nahezu gleichrangig in der Anzahl der Veröffentlichungen. Aber auch die Untersuchungen auf dem Gebiet der Wellen-Naben-Verbindungen finden in sieben Publikationen innerhalb von zehn Jahren ihren Niederschlag. Schließlich bleibt Prof. Raab auch dem Gebiet seiner Dissertation treu: Über all die Jahre werden Vorlesungen zur Spannungsoptik gehalten, und es gibt eine kleinere Reihe von Veröffentlichungen.

Die Technische Hochschule Darmstadt hat in der Zeitspanne, in der ihr Prof. Raab angehört, tiefgreifende Veränderungen erlebt. Die Fakultät für Maschinenbau ändert sich in den Fachbereich Maschinenbau, die Lehrstühle wandeln sich in Fachgebiete. Hatte die Fakultät für Maschinenbau im Jahr 1960 13 aktive Professoren, darunter einen außerordentlichen, so umfaßt der Fachbereich Maschinenbau heute bekanntlich 24 Fachgebiete. Der Fachbereich Maschinenbau ist im Vergleich zur ursprünglichen Fakultät erheblich gewachsen. Das betrifft auch die Zahl der Studenten und mit ihr die Aufgaben in der Lehre.

Bei aller Anspannung für das eigene Fachgebiet zeigte sich Prof. Raab immer aufgeschlossen für die Belange des Fachbereiches. In dem akademischen Jahr 1983/84 trägt er das Amt des Dekans. Neben den 18 Dissertationen aus dem eigenen Fachgebiet übernimmt Prof. Raab im Laufe seiner langen Zugehörigkeit zum Fachbereich Maschinenbau für 46 Doktoranden die Aufgabe des Koreferats. Die Betreuung von damit insgesamt 64 Dissertationen bedeutet einen erheblichen Einsatz und unterstreicht das immer kollegiale Verständnis, das Prof. Raab dem Fachbereich Maschinenbau und der Technischen Hochschule entgegengebracht hat. Dabei kommt in diesen Zahlen noch nicht zum Ausdruck, wie häufig Prof. Raab in besonderen Situationen seine Hilfe und Unterstützung angeboten hat. So war er stets ansprechbar, mündlichen Doktorprüfungen beizusitzen - um nur einen häufigen Engpaß beispielhaft zu erwähnen. Prof. Raab war immer ein aufgeschlossener Ansprechpartner - im Kreis der Kollegen wie auch gegenüber den Studenten. Der Dank des Fachbereiches Maschinenbau für alle geleistete Arbeit und Mitarbeit drückt sich darin aus, daß es nicht leichtfällt, den Kollegen Raab heute verabschieden zu müssen. Es begleiten ihn unsere besten Wünsche für ein weiterhin erfülltes Leben als Emeritus mit hoffentlich noch vielen Jahren in bester Gesundheit für ihn und seine Frau.



## **Festvorträge**





# Würdigung des Fachgebiets Maschinenelemente und Mechanik

von Gerhard Pahl

Die Würdigung des Fachgebiets Maschinenelemente und Mechanik ist selbstverständlich eine Würdigung von Professor Walter Raab, ohne damit die Leistungen und Ergebnisse seiner Mitarbeiter gering einstufen zu wollen. Seine Lebensleistung, seine Anregungen und seine Führung während fast dreißigjähriger Hochschullehrerzeit haben Lehrstil, Forschungsrichtung und Ergebnisse sowie den Ruf und das Ansehen des Fachgebiets und das seiner Mitarbeiter entscheidend geprägt. Vor ihm gab es keinen Lehrstuhl für Maschinenelemente und Mechanik mit so schwierigen und vielfältigen Aufgaben. Nach seiner Emeritierung wird es das Fachgebiet in der heutigen Form auch nicht mehr geben, weil sich einmal die technische Entwicklung geändert hat, und sich das Fachgebiet nun mit Recht der Mechatronik im Maschinenbau widmen soll. Zum anderen aber steht auch keine Persönlichkeit wie Walter Raab für das bisherige Aufgabenfeld mehr zur Verfügung.

Es war für die damalige Fakultät Maschinenbau einer der seltenen Glücksfälle, daß sie den jungen Verfahreningenieur und frischgebackenen Dozenten für Maschinenelemente an sich gezogen hat und mit der damals neuen, nicht einfachen Aufgabe betraute. Die erfolgreiche Leitung des Fachgebiets für Maschinenelemente und Mechanik mit der doppelten Aufgabe einer umfassenden Unterrichtung der Studenten für das höhere Lehramt an Berufsschulen und die Sicherstellung der Grundausbildung im Gestalten für die Studierenden der Elektrotechnik einschließlich der Wirtschaftsingenieure gleicher Fachrichtung erforderte solide Fachkenntnisse in Konstruktion und Grundlagen der Mechanik, in der Industrie gewonnene Erfahrung und ein überdurchschnittliches Maß an Lust und Liebe zum Lehren. Alles dies verkörperte Professor Raab in einem hohen Maße.

Lassen wir zum besseren Verständnis kurz seinen **Lebenslauf** an uns vorbeiziehen. Walter Raab wurde am 23. März 1929 in Darmstadt geboren. Als er gerade fünf Jahre alt war, siedelten die Eltern aus beruflichen Gründen nach Berlin um, wo er seine Schulzeit verbrachte. In entscheidenden jungen Jahren prägte diese Berliner Zeit durch die Vermittlung bestimmter preußischer Tugenden seine stets integre und verantwortungsbewußte Haltung den Menschen und den Dingen des Lebens gegenüber. Seine hohe Sensibilität und sein Wille zur Gestaltung des einmal als wesentlich Erkannten verdankte er der in seiner Familie verankerten künstlerischen Befähigung des zutreffenden Sehens und der umsetzenden Gestaltungsfähigkeit. Sein Vater war Bildhauer.

Die schweren Luftangriffe und die Kriegseignisse zwangen gegen Ende des zweiten Weltkriegs die Familie zur Rückkehr nach Darmstadt, wobei sie alle Vermögenswerte verlor. Hinzu kam 1947 der Tod des Vaters, durch den Mutter und Sohn die damaligen Notzeiten alleine meistern mußten.

Nach Abschluß der Schulausbildung in Dieburg und Darmstadt erlangte er 1948 das Abitur und begann nach einem Praktikum 1949 das Maschinenbaustudium in Darmstadt. Offensichtlich hatte der Wunsch, Schiffsingenieur zu werden, gegenüber der Tätigkeit in der Forstwirtschaft die Oberhand gewonnen. 1954 legte er das Diplom ab. Ich kann mich noch gut daran erinnern, wie der damalige Hilfsassistent am Lehrstuhl für Maschinenelemente von Professor Titschack unter meiner Betreuung seine Diplomarbeit anfertigte. Er klärte die Beanspruchungen durch die Umfangskraft an Armscheiben mit Hilfe der Spannungsoptik. Gegen Ende meiner eigenen Dissertation über Sicherungsringe unter Axiallast war Herr Raab einer meiner besten Gesprächspartner, und wir beide verbrachten viele Stunden an der seinerzeit sehr einfachen spannungsoptischen Anlage, diskutierten über deren verbesserbaren Einsatz und machten uns Gedanken über eine realitätsnahe Nachprüfung der bisher gewonnenen Ergebnisse. Es war eine hervorragende Zusammenarbeit, an die ich mit Vergnügen und Dankbarkeit zurückdenke. Sie hat dann auch unsere langjährigen, freundschaftlichen Beziehungen geprägt.

1961 promovierte Dipl.-Ing. Raab als wissenschaftlicher Assistent am gleichen Lehrstuhl und setzte mit dieser Arbeit über Sonderprobleme bei spannungsoptischen Untersuchungen im Maschinenbau u.a. meine begonnenen Untersuchungen über Sicherungsringe fort. Ein besonderes Problem war die auftretende Singularität an einer scharfen Ecke. Er entdeckte auch, daß der Herr Pahl an einer Stelle wohl nicht so genau hingeguckt hatte, und konnte durch eine erweiterte Betrachtung und Vervollständigung noch wertvolle Ergebnisse im Sinne einer endgültigen Absicherung und Vervollständigung gewinnen. Neben der Dissertation widmete er sich den umfangreichen Übungen in Maschinenelementen und hatte wichtigen Anteil an der Neubauplanung in der Magdalenenstraße, nicht ahnend, daß er eines Tages in die von ihm geplanten Räume einmal einziehen und in ihnen wirken würde.

Nach der Promotion ging der junge Doktor Raab zu den Vereinigten Glanzstofffabriken AG Wuppertal in das Werk Oberburg und wurde rasch Bereichsingenieur für Zentralforschung für die maschinenbaulichen Belange einer verfahrenstechnisch geprägten Industrieanlage. Hier galt es, sich mit Korrosionsfragen, der Temperaturwirkung, einer funktions- und sicherheitsgerechten Konstruktion von Komponenten und der Gesamtanlage verantwortlich auseinanderzusetzen. Unsere zwangsläufig seltener werdenden Kontakte, ich war inzwischen bei BBC in Mannheim tätig, zeigten mir aber immer wieder auf, mit welch hohem Engagement und sicherem Blick für die Lösung komplexer Probleme Herr Raab seine dortigen Aufgaben erfüllte. Seinem Wirken bei der Glanzstoff war es auch zu verdanken, daß die Technische Hochschule Darmstadt dort immer ein offenes Ohr und tatkräftige Unterstützung fand, was ich selbst nach meiner Berufung nach Darmstadt dann Ende der 60er Jahre persönlich erfahren und nutzen konnte.

Zwei berufliche Möglichkeiten veränderten den Lebensweg von Walter Raab ganz entscheidend: Einmal die Tätigkeit als Dozent an der neugegründeten Ingenieurschule Osnabrück und der Ruf an die Technische Hochschule Darmstadt. Die Entscheidung fiel für Darmstadt, nachdem es gelungen war, attraktivere Bedingungen für die Arbeitsmöglichkeiten zu erlangen. Die damalige Fakultät konnte sich gratulieren, die Besetzung durch Herrn Professor Raab erzielt zu haben.

Die Anfänge in Darmstadt waren für Herrn Raab außerordentlich schwierig und zum Teil enttäuschend. Die ins Auge gefaßten Räumlichkeiten standen, wie häufig, nicht zur Verfü-

gung. Mit Notunterbringungen in der Staatsbauschule in der Adelungstraße ging es los, denn die dort vorgesehenen Räume waren noch durch den Lehrstuhl für Arbeitswissenschaft besetzt, da der Neubau auf der Lichtwiese sich verzögerte. Von Räumen für experimentelle Untersuchungen war überhaupt nicht die Rede, erst nach Auszug der Arbeitswissenschaft konnten etwa ab 1969 die Einrichtung einer Werkstatt im Keller und ein provisorisches spannungsoptisches Labor auf dem Dachboden ins Auge gefaßt werden. Erst 1978/79 konnte Professor Raab dann in der Magdalenenstraße die Räumlichkeit und Experimentierfelder nutzen, die wissenschaftliche Arbeit angemessen ermöglichten.

Wenden wir uns nun der umfangreichen und vielfältigen **Lehre** von Professor Raab zu. Zum Wintersemester 1966/67 wurden die für die Lehramtsstudiengänge konzipierte Vorlesung "Mechanik und Maschinenelemente" aufgenommen. Diese Kombination war neuartig. Mit ihr sollte die enge Verknüpfung zwischen Grundlagen der Mechanik und ihre Umsetzung in anwendungsrelevante Fälle unter sachgerechter Nutzung der Maschinenelemente deutlich werden. Ein gedanklicher Prozeß, der auch normalen Maschinenbau-Studenten erfahrungsgemäß immer wieder große Schwierigkeiten bereitet. Gleichzeitig erhoffte man sich eine Straffung hinsichtlich des benötigten Gesamtstundenumfangs, der reduziert werden mußte, um den nach neuerer Auffassung notwendigen pädagogischen und gesellschaftspolitischen Fächern Platz zu machen. Der Unterricht umfaßte auch das Technische Zeichnen und eine in die Vorlesung integrierte Gestaltungslehre.

Mit Rücksicht auf Lernfortschritt der Studenten und der Gliederung in Fachrichtungen des Metallgewerbes, des Graphischen Gewerbes und des Elektrotechnischen Gewerbes ergab sich eine Vielzahl von abgestimmten Vorlesungen, die bei zeitweise relativ kleiner, dann wieder steigender Hörerzahl zu einer zeitaufwendigen Vorlesungstätigkeit führte, die Herr Professor Raab mit Ausnahme der Erstsemester grundsätzlich selbst wahrnahm. In der Rückschau hat sich diese Kombination von Mechanik und Maschinenelemente sehr gut bewährt, weil durch sie die schwierigen Transferprobleme gemildert werden konnten und der Student ein zugleich tieferes Verständnis bei einer praktisch besseren Umsetzungsfähigkeit erlangte.

Ab 1969/70 übernahm Herr Kollege Raab zusätzlich die aus meiner Sicht undankbare Aufgabe, einer zweisemestrigen Vorlesung "Technisches Zeichnen" und "Einführung in die Gestaltungslehre" für Studierende der Elektrotechnik, die er selbst aber sehr gern und mit hoher Motivation wahrnahm. Wegen der großen und steigenden Studentenmassen mit mehr als 700 Studenten mußte dann seit 1975/76 doppelt unterrichtet werden, da Räume und Betreuungskapazitäten hoffnungslos erschöpft waren.

Die elektrotechnischen Fachbereiche stellten zu Beginn etwas ungewöhnliche Anforderungen. So erinnere ich mich als damaliger Dekan noch sehr gut an die Diskussionen, nach denen z.B. sich nichts drehen dürfe, kein Drehmoment vorkommen solle und die Gestaltung kleiner Teile oder von umgeformten Blechteilen in Betracht zu ziehen sei. Professor Raab aber vertrat den ihm richtig erscheinenden Inhalt und setzte mit Geduld und Ruhe sein Konzept durch. Er scheute auch nicht den Ärger, den zuweilen unwillige Studentenmassen verursachen können, wenn sie nicht von ihrem eigenen Fachbereich für diesen Teil der Ausbildung bewußt motiviert werden. Er versah mit seinen sich stark engagierenden Mitarbeitern diese Aufgabe mit bemerkenswertem Erfolg.

Entspannender waren für Professor Raab die für höhere Semester angebotene spannungsoptische Blockvorlesung und das zugehörige Praktikum sowie die durchgeführten Seminare zur Konstruktionsmethodik bzw. Konstruktionswissenschaft.

Ich kenne keinen Hochschullehrer, der mit so viel Engagement, Beharrlichkeit und auch immer wieder neuen Ideen diese mannigfachen Lehrverpflichtungen wahrgenommen hat, im Fachbereich wegen Überlastung nicht klagte und niemals ein Forschungssemester beanspruchte. Pflichtgefühl, volle Wahrnehmung von einmal übernommenen Verantwortungen und hoher Fleiß kennzeichnen seine Person und seine Arbeit.

Nicht minder erstaunlich ist die Entwicklung von **Forschung** am Fachgebiet für Maschinenelemente und Mechanik. Zunächst ist festzustellen, daß für Professor Raab eine gravierende Benachteiligung bestand, die die Gewinnung von guten und interessierten Mitarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften bedeutsam erschwerte: Es gab keine Grundvorlesung und/oder in höheren Semestern angesiedelte Fachvorlesung, die junge Leute des Maschinenbaues hätte anziehen können, um dort erfolgreich wissenschaftlich zu arbeiten. Wir hatten zwar eine kollegiale Regelung derart vorgesehen, daß Studierende, die z.B. Höhere Konstruktionslehre bei mir oder ein anderes einschlägiges konstruktives Fach im Hauptexamen absolviert hatten, dann bei Professor Raab eine Studien- oder Diplomarbeit machen konnten. Dennoch war er auf eine indirekte Anziehungswirkung auf die Maschinenbau-Studenten angewiesen. Seine Mitarbeiter rekrutierten sich daher im wesentlichen aus der motivierten Schar der Hilfsassistenten der Übungen für die Elektrotechniker. Die große Zahl erfolgreicher Dissertationen, Studien- und Diplomarbeiten zeugt davon, daß Professor Raab nicht nur als Dienstleistungsfachbereich für andere Fachbereiche, sondern auch als eine maschinenbauliche Wirkungsstätte mit Attraktivität galt.

Angesichts der anfänglichen, räumlichen Misere war es naheliegend, sich mehr auf theoretischem Gebiet forschungsmäßig zu betätigen. So hat sich dann Professor Raab recht früh Gebieten der Konstruktionsmethodik gewidmet und Methoden zur Erfassung eines möglichst vollständigen potentiellen Lösungsfeldes entwickelt. Konstruktionskatalogen bis hin von der elektronischen Datenverarbeitung unterstützten Wissensspeichern galt seine besondere Aufmerksamkeit. Sein Blick richtete sich auf Grundsätzliches zu tabellarischen Lösungssammlungen (Arbeit Ewald), auf neue zeichnerische Darstellungsarten zur Unterstützung beim methodischen Vorgehen und zugleich geeignet als Symbole im Rechner zu verwenden (Arbeit Lüpertz), auf sicherheitstechnische Belange (Arbeiten Mayer und Storand) sowie ergonomischer Gesichtspunkte (Arbeit Neudörfer und Boehme). Die fachliche Affinität zu ergonomischen Fragen rührte sicher nicht nur aus der räumlichen Nähe des Lehrstuhls für Arbeitswissenschaft in den Anfangsjahren sondern auch aus der Veranlagung von Herrn Raab, Dinge des Menschen in vernünftiger Relation zu sehen und die Würde des Menschen bei den technischen Entwicklungen zu achten.

Mit fortschreitender Fähigkeit rechnerunterstützter Systeme war es dann naheliegend, sich auch Informations- und Wissenssystemen zuzuwenden, bei denen, wiederum typisch für Herrn Raab, psychologische Aspekte eine wichtige Rolle spielten (Arbeiten Rogler, Gutberlet, Größer). Die Arbeiten Unland und Schneider bewiesen daneben, daß die konstruktionsmethodischen Werkzeuge praktisch umsetzbar waren und die Überlegungen nicht im Theoretischen oder Grundsätzlichen stecken blieben, wie überhaupt die Umsetzung solcher Erkenntnisse bei Professor Raab eine entscheidende Rolle spielten, das sich auch in der er-

folgreichen Zusammenarbeit mit der Industrie, z.B. mit der bekannten Firma Wella, manifestierte. Die noch laufenden Arbeiten von Hain und Fabrig befassen sich mit der Problematik beim Bewerten bzw. mit Kosteninformationssystemen.

Die von ihm selbst gemachten Einsichten und Erfahrungen während seiner Promotion initiierten die Weiterbeschäftigung mit Problemen der Kerbwirkung, insbesondere an Welle-Nabe-Verbindungen. Wir finden hier wieder ein Beispiel, wie frühe Erlebnisse richtungsweisend nachwirken. So widmete er sich der Mehrfachkerbwirkung und der Optimierung von Entlastungskernen sowie dem experimentell so schwierig zugänglichen Gebiet der Paßfederverbindung (Arbeiten Perseke, Zang, Weigand und Renneisen). Hier wartete das Fachgebiet mit sehr förderlichen Erkenntnissen auf, die mein Mitarbeiter Heinrich und ich bei der Wiederaufnahme der Untersuchung von Kerbwirkung an Sicherungsringverbindungen außerordentlich gut mitverwerten konnten. Das Wirken von Professor Raab in der Forschungsvereinigung Antriebstechnik mit dem Forschungsthema der Welle-Nabe-Verbindung und den noch im Gang befindlichen Arbeiten von Günther und Oldendorf haben dort deutliche Erkenntnis Spuren hinterlassen.

Ein dritter Forschungsbereich befaßte sich, verstärkt nach Einzug in die Magdalenenstraße, mit der Antriebstechnik, wobei sein Interesse den Riemen- und Kettengerieben galt. Die Arbeiten Langer, Binz und Pawlik sowie die laufenden Arbeiten Dörsam und Kraus zeugen davon.

Beide Antriebsarten waren in der Wissenschaft etwas stiefmütterlich behandelt worden. Eine Anreicherung unseres Wissens durch die Arbeiten im Fachgebiet von Herrn Professor Raab war daher sehr interessant. Meine Bitte vor einiger Zeit, über die Zugmittelgetriebe im Rahmen der Konstruktionsbuchreihe ein Buch zu schreiben, lehnte Herr Raab leider ab, indem er in seiner Bescheidenheit und Zurückhaltung auf eine Veröffentlichung von Professor Müller, Rostock, verwies und meinte, daß dort ein kompetentes Buch vorliege. Mit ihm entstanden schon vor der Wende fruchtbare Kontakte, die sich nach Öffnung der Mauer in eine intensive Zusammenarbeit einschließlich der Übernahme von Korreferaten bei Doktorarbeiten entwickelte.

Schließlich sollte auf dem Gebiet der Forschung nicht die Arbeit Uhrig unerwähnt bleiben, die sich mit der korrosions- und dauerfesten Auslegung von Schutzhülsen für Thermometer und Thermoelemente befaßte. Diese sicherlich aus seiner verfahrenstechnischen Erfahrung herrührende Fragestellung ist ein typisches Beispiel für die Betrachtungsweise von Professor Raab. Er sieht Detailfragen nicht als zu gering an, um sie mit wissenschaftlich geschärftem Werkzeug anzugehen und eine für die Praxis nützliche Lösung zu finden.

Selbstverständlich unterzog sich Professor Raab auch einer Reihe von Verpflichtungen in der Selbstverwaltung der Hochschule. Von der stattlichen Anzahl möchte ich nur einige wenige hervorheben: Die Zeit als Dekan 1983/84, in der auch der neue Studienführer "Maschinenbau" erschien. Seine Mitgliedschaft im Strukturausschuß und seine langjährige Mitwirkung als Mitglied im Prüfungsausschuß des Studienkollegs. Von besonderem Gewicht ist seine Tätigkeit im Wissenschaftlichen Prüfungsamt für Absolventen des Lehramts an beruflichen Schulen schon seit 1966 einzustufen. Nach Emeritierung von Professor Huhle im Jahre 1976 übernahm er die Tätigkeit des ersten Stellvertreters des Leiters des Prüfungsamts.

In allen diesen Tätigkeiten beeindruckte uns Professor Raab durch seine menschlich angenehme Haltung. Keine Ränke im Kollegenkreis, keine überzogenen Forderungen, eher Zurückhaltung als Vordrängen und stets ein erst nach intensivem Zuhören abgewogenes Urteil. Bereitschaft zu Hilfe in menschlich schwierigen Situationen und Suche nach einem tragbaren Kompromiß, bei dem er meist selbst einen gehörigen Anteil trug, sind kennzeichnend. Daneben eine wohltuende Prinzipienfestigkeit hohen Ausmaßes und das absolute Festhalten an Qualität und Niveau. Den Mitarbeitern gegenüber wirkte er fachlich überzeugend, mehr kollegial mit leisen Tönen, aber wohl bestimmend.

Besonderer Dank gilt Frau Raab, die ihm die Freiräume ermöglichte, den beruflichen Einsatz leisten zu können, und dabei manche Sorgen und Nöte der Familie meisterte. Es sollte erwähnt werden, daß aus der Familie Raab beide Töchter Irene und Christiane als Diplom-Ingenieurinnen hervorgegangen sind. Abgesehen von der wünschenswerten Vermehrung des weiblichen Geschlechts in unserem bisherigen Männerberuf zeugt dieser Umstand aber auch von der Überzeugungskraft eines leidenschaftlichen Ingenieurs und einer intakten Familie.

"Wenn Sie, lieber Herr Raab, Ihrem dritten Lebensabschnitt entgegensehen und von den Pflichten, die Sie solange und so gut erfüllt haben, entbunden werden, wird der Fachbereich in Ihnen eine verlässliche Stütze und ein angesehenes aktives Mitglied vermissen. Ihnen wünschen wir für die nächsten Jahre Gesundheit, Zufriedenheit mit dem von Ihnen Erarbeiteten und die Freiheit, das zu tun, was nun in Ihren Absichten höhere Priorität erlangt. Möge das Wandern und die Musik Ihr Herz erfreuen. Dampflokomotiven werden nach wie vor Ihr besonderes Interesse finden. Ich bin gewiß, daß sich nicht nur die Kollegen im Maschinenbau diesen Wünschen anschließen, sondern ebenso herzlich und aufrichtig auch Ihre Mitarbeiter und ehemaligen Schüler, die sich als die "RAAB-Brothers" verstehen."



# **Beanspruchungsgerechte Bauteilgestaltung durch Spannungsoptik**

**von Arnold Hirchenhain**

Die Leistungen und Anforderungen in der Automobilindustrie haben in den letzten 12 Monaten dramatisch zugenommen. Somit ist es auch nicht überraschend, daß die Forderungen an die Zulieferindustrie, an die Hersteller von Komponenten, extrem gestiegen sind. Daraus sind anspruchsvolle und herausfordernde Aufgaben auch für den weltweit führenden Hersteller von Fahrzeugsitzen, den Gebr. Isringhausen, erwachsen, der als Zulieferer von

- Sitzen für Nutzfahrzeuge
- Technischen Federn
- sowie
- Fahrzeugkomponenten

seit mittlerweile über 75 Jahren erfolgreich am Markt tätig ist.

## **Kundenspezifische Anforderungen**

Das Unternehmen Isringhausen mit Stammsitz in Lemgo/Westfalen arbeitet bei praktisch allen anstehenden Problemlösungen sehr eng mit dem Fahrzeughersteller, also dem Kunden, zusammen, wobei auch der Teilezulieferer bereits im frühen Entwicklungsstadium mit in die Kooperation einbezogen wird.

Einer der Arbeitsschwerpunkte ist u. a. die Untersuchung des Verformungs- und Festigkeitsverhaltens von Bauteilen und Baugruppen unter statischen und dynamischen Belastungen und Beanspruchungen. Zur Verfügung steht ein entsprechendes Equipment für theoretische und experimentelle Beanspruchungsanalysen sowie Crash- und Simulationsanlagen zur Erzeugung von dynamischen Kraft- und Beschleunigungsverläufen zur Durchführung der geforderten und mittlerweile unerlässlich gewordenen umfangreichen experimentellen Prüfungen.

Nutzfahrzeuge, seien es nun Lastkraftwagen, Baumaschinen, Flurförderfahrzeuge, Omnibusse, Fahrzeuge aus dem Bereich der Agrartechnik oder auch Wohnmobile, sind in besonderer Art geeignet, auch dem nicht mit technischen Fragen Befäßen zu verdeutlichen, was unter "Anforderungen" zu verstehen ist. Beschränkt man dabei den Gesamtkomplex der Produktpalette aus

- Fahrkomfort und Zuverlässigkeit
- Wirtschaftlichkeit und Sicherheit
- Verschleißverhalten
- und
- Umweltverträglichkeit

allein auf das Festigkeitsverhalten der Bauteile und Baugruppen, so sind selbst hier für den

Komponentenhersteller Beschränkungen notwendig: Verschleiß, Umgebungstemperaturen - bei direkter Sonneneinstrahlung entstehen in der Fahrzeugkabine leicht Temperaturen im Bereich von 70° bis 80° C - und Korrosionseinwirkungen sowie das Verhalten in der Gesamtstruktur "Fahrzeug" bzw. "Fahrzeugkabine" müssen zunächst häufig unbeachtet bleiben. Zudem sind die Verteilungsfunktionen der zeitlich veränderlichen und statistisch streuenden örtlichen Bauteilbeanspruchungen (Kollektive) dem Zulieferer weit weniger bekannt als wünschenswert und erforderlich. Auch aus diesem Grund ist die Zusammenarbeit zwischen Fahrzeughersteller und Zulieferer zwingend erforderlich. In diesem Rahmen werden u. a. die zeitlichen und die Kostengrenzen festgelegt, innerhalb derer Festigkeits- und Beanspruchungsanalysen durchgeführt werden sollen.

### Entwicklungsschritte

Die Entwicklung von Komponenten durchläuft in der Regel vier Schritte:

Während des ersten Schrittes der grundlegenden Dimensionierung einer Komponente, vorgenommen vom Fahrzeughersteller, werden aufgrund von Annahmen, Erfahrungen oder Messungen die wesentlichen Einflüsse auf die Schwingfestigkeit respektive Lebensdauer eingegrenzt

- Lastfälle
- Werkstoff  
und
- Formgebung

Der zweite Schritt betrifft Untersuchungen mit dem Ziel der Verbesserung bis zur Optimierung unter dem Blickwinkel der Wirtschaftlichkeit und der Ermittlung von Einflüssen aus

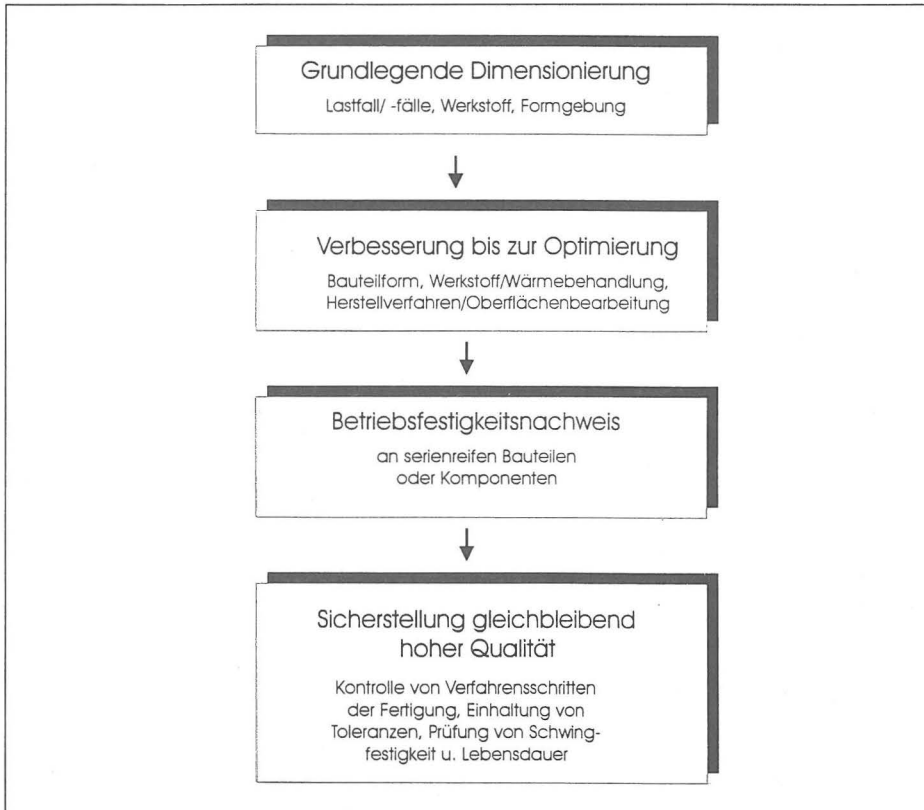
- Gestalt bzw. Form des Bauteils
- Werkstoff und Wärmebehandlung  
sowie
- Herstellungsverfahren und Oberflächen-  
bearbeitung und -nachbehandlung

In einem dritten Schritt muß dann der Betriebsfestigkeitsnachweis an serienreifen Bauteilen oder Komponenten unter betriebsnahen oder realen Betriebsbedingungen erfolgen - ein Schritt, der in der Regel vom Fahrzeughersteller oder in dessen Auftrag durchgeführt wird.

Mit dem vierten Schritt schließlich wird Sorge dafür getragen, daß - bezogen auf den erreichten technischen Stand - eine gleichbleibend hohe Qualität erzeugt wird. Sie bezieht sich nicht nur auf die Kontrolle von Verfahrensschritten der Fertigung und die Einhaltung von Toleranzen, sondern auch auf die Prüfung von Schwingfestigkeit und Lebensdauer sowie deren statistische Streuung.



Die Zulieferindustrie sowie deren Forschungs- und Entwicklungsabteilungen arbeiten mit zunehmendem Aufwand im Bereich des zweitgenannten Schrittes. Hierbei stehen nicht nur verschiedene Werkstoffgruppen im Wettbewerb zueinander, sondern insbesondere auch Formgebung, Gestaltungsprinzipien und Gewichthsoptimierungen entsprechend Kundenforderung.



**Bild 1:** Entwicklung von Komponenten

### Experimentelle Beanspruchungsermittlung

Zu den heute verwendeten Methoden der Beanspruchungsermittlung gehören neben der Finite-Elemente-Methode und den Verfahren der Höheren Festigkeitslehre, der Erprobung am Bauteil selbst durch Messungen mittels Dehnungsmeßstreifen, Holografischer Interferometrie, Thermoelastischer Spannungsanalyse u. ä. oder durch Dauerversuche sogenannte Modellmethoden, die zur Optimierung der Bauteilform respektive Gestaltfestigkeit und/oder Gewichthsoptimierung eingesetzt und herangezogen werden. Zu diesen Modellmethoden zählt auch die Spannungsoptik, die sich der physikalischen Bausteine

- Polarisation
- Spannungsdoppelbrechung  
und
- Interferenz

bedient.

### **Spannungsoptik - historische Meilensteine**

Mit Hilfe der Spannungsoptik kann man bekanntlich die Verteilung von Spannungen in Bauteilen direkt sichtbar machen. Sie wird deshalb sowohl zum quantitativen Messen als auch zur Untersuchung verwickelter Spannungszustände selbst erfolgreich eingesetzt.

Das Wort "Spannungsoptik" wurde von G. Mesmer geprägt als Übersetzung des englischen Begriffs "Photoelasticity", also Fotoelastizität.

Die physikalischen Grundlagen wurden bereits im 19. Jahrhundert von Physikern geschaffen, die sich mit der Natur des Lichtes beschäftigten, weil zu dieser Zeit der Streit zwischen den Anhängern der Newtonschen Korpuskulartheorie und der Huygensschen Wellentheorie noch heftig im Gange war.

Im Jahre 1816 entdeckte D. Brewster, daß eine Glasplatte, die unter Spannung gesetzt wurde, ähnliche Doppelbrechungserscheinungen zeigte wie ein einachsiger Kristall. Er fand jedoch keinen quantitativen Ansatz für die Beziehung zwischen Spannung und optischem Effekt. Vier Jahre später demonstrierte M. A. Biot, daß ein Glasstreifen Doppelbrechung zeigt, wenn er in Längsschwingungen versetzt wird. Aber erst 1841 erstellte F. E. Neumann eine Theorie dieses Effekts. Er drückte die Geschwindigkeit der zwei Lichtwellen als Funktion der drei Hauptdehnungen im Material aus. Unabhängig davon stellte J. C. Maxwell zwölf Jahre später eine Theorie auf, in der die Geschwindigkeit mit den Hauptspannungen in Beziehung gesetzt wurde. Beide Theorien ergaben Beziehungen ähnlicher Form und bildeten die Grundlage aller folgenden Arbeiten.

Die ersten spannungsoptischen Materialkonstanten wurden quantitativ von Wertheim im Jahre 1854 bestimmt. In den Jahren 1902-1912 beschäftigte sich L. N. G. Filon intensiv mit dem Effekt der Spannungsdoppelbrechung einschließlich der Dispersion, die später von E. Mönch als Maß für die plastische Verformung eingeführt wurde. In seinem mit E. G. Coker verfaßten Werk sind die physikalischen Grundlagen des Phänomens der künstlichen Doppelbrechung eingehend behandelt.

Vermutlich war A. Mesnager der erste, der 1912 den ersten erfolgreichen Versuch zur Bestimmung von Spannungen bei einem praktischen Ingenieurproblem, einer Brückenkonstruktion, durchführte.

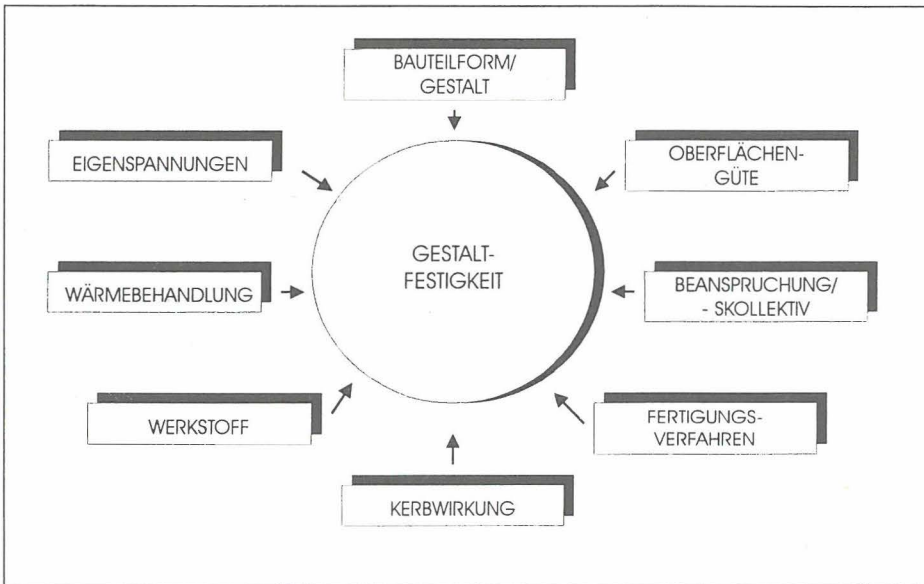
Einen wesentlichen Fortschritt brachte die Entdeckung des "Einfrierverfahrens" durch G. Oppel (1936), mit dem nun auch der räumliche Spannungszustand untersucht werden konnte. Diese Methode wird seit der Einführung der Epoxidharze in die Spannungsoptik mit großem Erfolg in der Ingenieurpraxis angewandt. Insbesondere haben die Arbeiten von A. Kuske, M. Hetényi und E. Mönch dazu beigetragen, daß die Versuchs- und Auswertetechnik den heutigen hohen Stand erreicht haben.

## Einsatzgebiete der Spannungsoptik

Als Ergänzung und/oder in Kombination zu rechnerischen Methoden der Beanspruchungsermittlung läßt sich die Spannungsoptik in vielen Fällen mit großer Effizienz einsetzen. Ihre Vorteile sind:

- einfache Erfassung des gesamten Spannungsfeldes mit den Linien gleicher Hauptschubspannung als direkte Meßgröße; es lassen sich komplexe Zusammenhänge übersichtlich demonstrieren; im Bereich der Gestaltfestigkeit kann die Form sehr schnell optimiert werden
- einfacher Überblick über die Hauptspannungsrichtungen aus den Isoklinen
- Ergänzung und Überprüfung rechnerischer Methoden bei schwierigen Problemstellungen oder Randbedingungen (z. B. Reibung, Kontaktprobleme) und bei nicht-linearem Verformungsverhalten
- Sichtbarmachen physikalischer Zusammenhänge bei dynamischer Beanspruchung, z. B. Stoßwellenausbreitung, und damit Überprüfung theoretischer Ansätze zur Lösung dynamischer Probleme
- Einblick in das Verhalten von Verbundkonstruktionen einschließlich der Grenzschichten zwischen unterschiedlichen Materialien
- einfaches und anschauliches Bestimmen von Verformungen auch an Innenteilen von Konstruktionen, weil sich diese ebenso wie die Spannungen fixieren lassen
- Ermittlung von Spannung und Verformung in geometrisch komplexen Körpern, bei denen der Einsatz numerischer Methoden falliert oder zu aufwendig wäre
- wirtschaftliche und zuverlässige Ermittlung der Beanspruchung mit Optimierung der Gestaltfestigkeit und/oder Gewicht
- beim Oberflächenschichtverfahren läßt sich sehr schnell ein qualitativer Überblick mit einer relativ einfachen Meßapparatur erzielen; ermöglicht werden mit diesem häufig auch als Foto-Stress-Methode bezeichnetem Verfahren auch Messungen an Originalbauteilen oder im Betrieb.

Als gewisser Nachteil muß jedoch in Kauf genommen werden, daß - außer beim Oberflächenschichtverfahren - die Spannungen i. a. am Modell ermittelt werden müssen, was häufig mit einer zeitaufwendigen Modellherstellung verbunden ist.



**Bild 2:** Einflußgrößen auf Gestaltfestigkeit

### Modellherstellung durch Stereolithografie

Mit der Entwicklung des Stereolithografie-Verfahrens zur Herstellung dreidimensionaler Kunststoffbauteile ohne traditionelle Werkzeuge und ohne Formen ist jedoch ein weiterer entscheidender experimenteller Meilenstein in der historischen Entwicklung der Spannungsoptik geglückt, das die Modellherstellung durch Vereinigung der Technologien Polymerchemie, Lasertechnik und CAD/CAM inzwischen drastisch vereinfacht. Der häufig gegenüber der Finite-Elemente-Methode angeführte Nachteil des hohen Zeitaufwands zur Modellherstellung hat durch dieses Verfahren inzwischen erheblich an Bedeutung verloren.

### Geforderte Genauigkeit der Meßergebnisse

Im Fahrzeug- und Komponentenbau sind die Anforderungen an die Meßgenauigkeit unterschiedlich. Viele Materialwerte, Belastungskollektive und Einsatztemperaturen sind häufig extremen Schwankungen unterworfen.

So haben z. B. Nachmessungen des Elastizitätsmoduls von Gußwerkstoffen für Komponenten für Nutzfahrzeuge, die von einem namhaften Fahrzeughersteller durchgeführt wurden, Differenzen im gleichen Bauteil bis ca. 30% und in der gleichen Charge sogar bis zu ca. 40% ergeben. Damit variieren natürlich auch die mit dem E-Modul verknüpften Zieldaten, wie Beanspruchungsmessungen sowie Schwingungs- und Verformungsanalysen in der Bandbreite dieser Schwankungen. In diesen Einsatzfällen braucht die Meßgenauigkeit und Auflösung nur diesen Bedürfnissen genügen.

### **Beanspruchungshöhe und Bauteillebensdauer**

Anders verhält es sich jedoch bei den Streuungen der Belastungen. Zwar eröffnet der Einsatz auf praktisch allen Straßen dieser Welt und in jeder denkbaren kundenspezifischen Situation ein riesiges, zu berücksichtigendes Lastkollektiv, dessen mechanische Relevanz durch das weltweite Spektrum von Einsatztemperaturen nochmals gespreizt wird. Da aber das Kundenfeld in den Erprobungen bis hin zu definierten Extremgrenzen abgedeckt sein muß, wurden für die unterschiedlichen Komponenten auf der Basis langer Erfahrung repräsentative Lastkollektive entwickelt.

Die Bauteile, die diese Testreihen erfolgreich überstehen, werden im Kundenbetrieb unterhalb der zu akzeptierenden Ausfallquote bleiben und können zur Serienfertigung freigegeben werden. Überstehen sie diese nicht, macht die einfache Faustregel etwa bei Stahlteilen:

- Senkung der Beanspruchung um 10% erhöht die Lebensdauer um etwa 100%

somit deutlich, mit welcher Genauigkeit eine Optimierungsaussage zutreffend ist. Je geringer die noch notwendige Senkung der Beanspruchung ist - und die letzten Prozente sind immer die schwierigsten und die teuersten - um so präziser muß die Auflösung des gewählten Verfahrens sein.

### **Simulationsverfahren**

Aus diesen Forderungen heraus haben sich Techniken entwickelt, bei denen in ein und demselben Versuchsaufbau, mit gleichen Annahmen und damit auch mit gleichen Systemfehlern behaftet, unterschiedliche konstruktive Lösungen analysiert und optimiert werden. Die Aussage ist entsprechend ein relativer bewertender Vergleich zwischen den verschiedenen Konstruktionen. Für solche Bauteiloptimierungen eignet sich die Spannungsoptik ebenfalls in hervorragender Weise, da mit einfachsten Mitteln schnelle und effektive Formvariationsüberprüfungen vorgenommen werden können.

Der Optimierungsprozeß mit seinen häufig notwendigen Verbesserungsschleifen beginnt mit einfachen und schnellen Verfahren der geometrischen Formoptimierungen. Mit zunehmender Produktreife und abnehmendem Versagensrisiko kommen immer aufwendigere und teurere Simulationsverfahren zum Einsatz.

Die teuerste Prüfung, auf die aber keinesfalls verzichtet werden kann, sind die bestätigenden Fahrversuche. Hierbei werden nicht nur Funktionsüberprüfungen durchgeführt, sondern auch alle straßentechnischen Aspekte und alle denkbaren extremen kundenlandspezifischen Besonderheiten berücksichtigt. Diese Versuche stellen sicher, daß alle vorangegangenen Simulationen auch die letzte Schwachstelle identifizieren konnten.

### **Wirtschaftlichkeit und Produktionskosten**

Aufgabe des Versuchsmanagements ist es, in allen Phasen der Entwicklung unter Minimierung der Gesamtkosten und im Rahmen des vorgegebenen Zeitrasters durch die Wahl der geeigneten Verfahren - und hierzu zählt nach wie vor die Spannungsoptik - das Entwicklungsrisiko unter Kontrolle zu halten.

Hat die Optimierung der Gestaltfestigkeit den gewünschten Effekt erbracht und ist die technische Realisierbarkeit abgeklärt, so hat sich der erarbeitete Vorschlag letztlich auch dem Kriterium Produktionskosten zu stellen. Dabei darf nicht unerwähnt bleiben, daß 1,- DM Mehrkosten pro Fahrzeugsitz in unserem Hause etwa eine halbe Million DM Ergebnisminderung pro Jahr bedeuten.

# **Berechnung von Welle-Nabe-Verbindungen - Entwicklung der letzten 10 Jahre -**

**von Erhard Leidich**

## **1. Einleitung**

Die Welle-Nabe-Verbindungen (WNV) gehören mit den Wellen und Rädern zu den historisch ältesten Maschinenelementen. Entsprechend vielfältig sind die im Laufe der technischen Entwicklung gefundenen Bauformen. Zur Auswahl der für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeigneten WNV stehen Konstruktionskataloge /1/ und neuerdings auch wissensbasierte Systeme /2/ zur Verfügung.

Die praktische Erfahrung zeigt, daß sich in den einschlägigen Branchen des Maschinenbaus nur wenige WNV wirklich durchgesetzt haben. Deshalb benötigt der Konstrukteur weniger die Unterstützung bei der Auswahl als vielmehr bei der Berechnung und Gestaltung von WNV. Wissensbasierte Systeme stellen dafür eine gute Basis dar, obgleich die genannten Auslegungsschwerpunkte bisher nur unzureichend von diesen unterstützt werden. Die Einbindung bestehender Berechnungsprogramme und bekannter Gestaltungsrichtlinien ist jedoch nichts weiter als Fleißarbeit.

Die physikalischen Vorgänge bei der mechanischen Beanspruchung von WNV sind äußerst vielschichtig. Es ist aus wirtschaftlichen Gründen unmöglich, alle Einflußgrößen in einer Festigkeitsrechnung zu erfassen. Daher ist es zwingend notwendig, ein physikalisches Modell zu finden, das die wesentlichen Einflußgrößen erfaßt und eine mathematische Behandlung mit vertretbarem Aufwand und ausreichender Genauigkeit gestattet. Die numerische Rechen-technik, gepaart mit leistungsstarken elektronischen Datenverarbeitungsanlagen, ermöglicht heute durch fein strukturierte Berechnungsmodelle vertiefte physikalische Einsichten. Der Erkenntnisstand über die Beanspruchung von WNV wurde hierdurch in den letzten 10 Jahren erheblich ausgeweitet.

Kollmann /1/ hat in seinem 1984 erschienenen Buch "Welle-Nabe-Verbindungen" den Stand der Technik zusammengefaßt. Die folgenden Ausführungen behandeln bedeutende Forschungsergebnisse der letzten 10 Jahre, die sowohl die industrielle Forschung - gefördert durch die AIF - als auch die Grundlagenforschung - gefördert durch die DFG - betreffen.

## **2. Paßfederverbindungen**

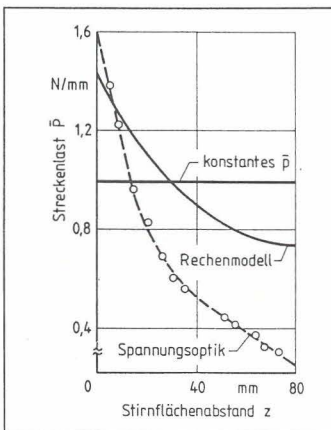
Die Paßfederverbindung ist die am häufigsten eingesetzte formschlüssige Welle-Nabe-Verbindung. Sie zeichnet sich durch eine einfache Montage bzw. Demontage aus. Dies dürfte auch der Hauptgrund sein, warum sich diese Verbindung trotz der zunehmenden Forderung nach dynamisch hoch belastbaren WNV - die Paßfederverbindung ist für quasistatische Drehmomente geeignet - nach wie vor am Markt behauptet. Die Haupteinsatzgebiete sind Industrie- und Großgetriebe und vor allem der Elektromotorenbau.

Die bisher existierenden Berechnungsansätze erfassen die realen Beanspruchungen nur unzureichend. Das Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik der TH Darmstadt unter der Leitung von Prof. Raab befaßt sich seit mehr als 10 Jahren mit den Beanspruchungen in Paßfederverbindungen. Das derzeit am genannten Fachgebiet im Auftrag der Forschungsvereinigung Antriebstechnik bearbeitete Forschungsvorhaben "Ermittlung der Dauerhaltbarkeit von Paßfederverbindungen" /3/ wird die bisherigen sehr erfolgreichen und wegweisenden Arbeiten abrunden. Es ist schon jetzt abzusehen, daß die Ergebnisse wichtige Bausteine für die im Entwurf befindliche DIN 6892 sein werden. Im folgenden werden einige wichtige Erkenntnisse aus den Dauerfestigkeitsuntersuchungen wiedergegeben.

Maßgebend für die Paßfederverbindungen ist die zulässige Flächenpressung. Dabei wird vorausgesetzt, daß sich zwischen Welle und Paßfeder einerseits sowie zwischen Paßfeder und Nabe andererseits bei der Übertragung des Drehmomentes eine in axialer Richtung konstante Flächenpressung einstellt. Die Gleichung für das übertragbare Drehmoment (eine Paßfeder) lautet demnach:

$$M_t = \frac{D}{2} (h - t_1) l_{tr} p_{zul} \quad \text{Abmessungen nach DIN 6885} \quad (1)$$

Das durch Gleichung (1) beschriebene Berechnungsmodell stellt eine sehr grobe Approximation der Beanspruchungen von Paßfederverbindungen dar. Militzer /4/ hat bereits 1975 durch umfangreiche dreidimensionale spannungsoptische Untersuchungen nachgewiesen, daß die Streckenlast an einer Paßfeder nicht konstant ist, sondern den im **Bild 1** dargestellten Verlauf aufweist. Demnach liefert das elementare Berechnungsmodell um ca. 40% zu niedrige Werte der maximalen Flächenpressung.

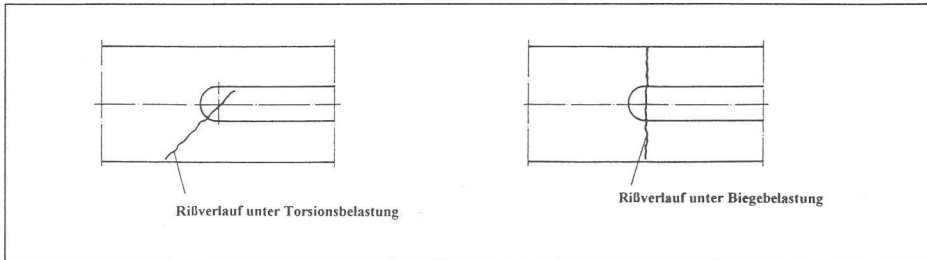


**Bild 1:**  
Berechnete und spannungsoptisch gemessene Streckenlast an einer Paßfederverbindung A 14x9x80 DIN 6885

Das von Militzer entwickelte Berechnungsverfahren wird in den Normenentwurf übernommen. Wesentliche Änderungen bei der Paßfederdimensionierung sollten sich daraus allerdings nicht ergeben, da die Sicherheit gegen plastisches Fließen nach einschlägigen Praxiserfahrungen durchaus  $S_F = 1$  sein darf; im Gegensatz zu den heutigen Vorgaben von  $S_F \geq 1,5$ .



Neben dem Ausschlagen der Paßfeder ist der Wellenbruch die häufigste Ausfallursache bei Paßfederverbindungen. Interessanterweise wird diese Problematik in vielen Maschinenelemente-Lehrbüchern bisher nur gestreift, was wohl an den noch relativ neuen Forschungsergebnissen des Fachgebiets Maschinenelemente und Mechanik der TH Darmstadt liegen mag. Prof. Raab u.a. haben in /5/ und /6/ den komplexen Beanspruchungszustand in der Welle im Bereich der Paßfedernut beschrieben. Demzufolge ist die bei Torsionsschwingversuchen ermittelte Versagensursache der Paßfederverbindung (**Bild 2**) ein Schwingungsschleiß im



**Bild 2:** Rißverlauf in der Welle einer torsionsbelasteten und einer biegebelasteten Paßfederverbindung; Werkstoff Ck45

Paßfedernutendbereich, der zu Anrissen an den kaltverschweißten Oberflächen der Nutwand führt. Der Anrißort in der Mitte der Nutwand ist nicht identisch mit der höchsten Spannungskonzentration am Nutrand. Ein Beweis dafür, daß das Versagen auf eine sogenannte Reibdauerbeanspruchung zurückzuführen ist.

Aus diesen Erkenntnissen wird deutlich, daß bei Untersuchungen an Paßfederverbindungen stets das gesamte System Welle-Paßfeder-Nabe zu betrachten ist. Die bisher aus der Literatur bekannten Spannungsformzahlen und Kerbwirkungszahlen genügen meist nicht den Anforderungen, da sie vielfach an genuteten Wellen (ohne Paßfeder und Nabe) ermittelt wurden, oder eine Verallgemeinerung nicht zulassen. Weiterhin offen ist die Frage, ob bei Reibdauerbeanspruchung überhaupt von einer Dauerhaltbarkeit ausgegangen werden kann.

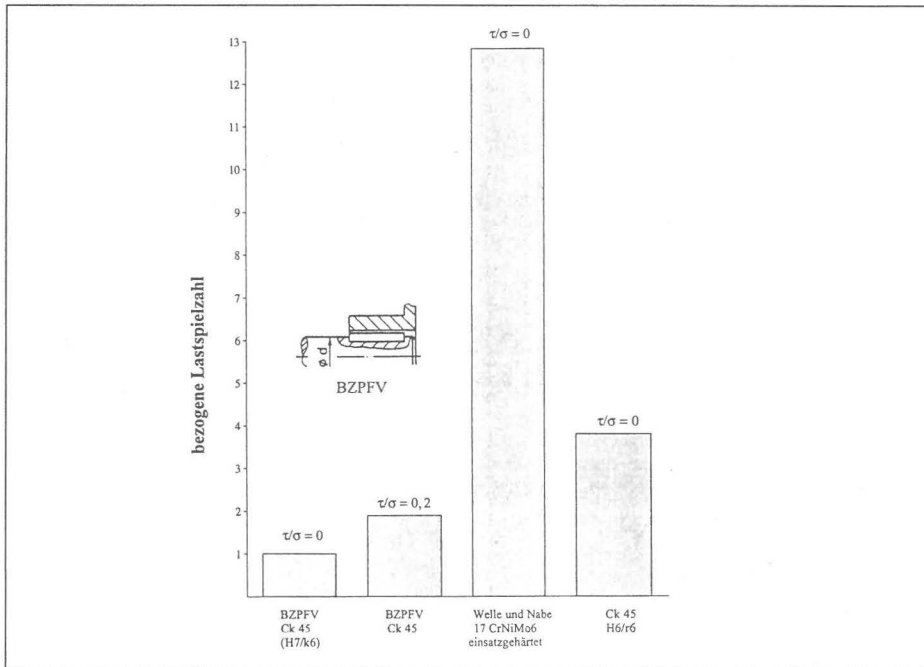
Bei den bisher durchgeführten bzw. noch laufenden Untersuchungen an umlaufbiegebeanspruchten Paßfeder-Verbindungen ist ebenfalls Schwingungsschleiß zu beobachten und zwar

- an der Wellenoberfläche im Bereich der Nabenkante und entlang der Wellennutkante des prismatischen Nutteils,
- an der Paßfedernutwand am Übergang vom halbkreisförmigen Nutendbereich zum prismatischen Nutteil.

Die bruchentscheidenden Risse gehen von der Nutwand aus. Sie beginnen auf beiden Seiten der Wellennut und verlaufen, wie bei Biegung üblich, senkrecht zur Wellenachse (Bild 2).

In **Bild 3** sind einige am Fachgebiet von Prof. Raab ermittelte Versuchsergebnisse zusammengefaßt. Es wird deutlich, daß alle Maßnahmen zur Reduzierung des Schwingungsschleißes in der Nut, wie einsatzgehärtete Welle und überlagerte statische Torsion, eine Festigkeitssteigerung bzw. höhere ertragbare Lastspiele bewirken. Der rechte Balken läßt den

Schluß zu, daß eine engere Passung ähnliche Auswirkungen auf die Festigkeit hat wie bei Preßverbindungen. Für diese werden zur Reduzierung der Reibdauerbeanspruchung hohe Übermaße empfohlen. Enge Passungen wird der Konstrukteur bei Paßfederverbindungen aber nur selten wählen, weil dann zumindest der Vorteil der einfachen Demontage verloren geht.



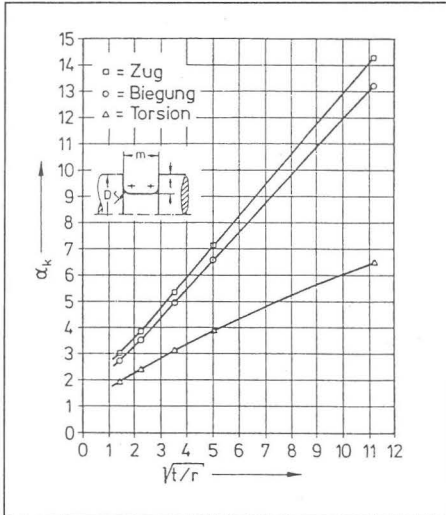
**Bild 3:** Lebensdauer von Paßfederverbindungen unter Umlaufbiegung ( $\tau/\sigma = 0$ ) und unter Umlaufbiegung mit überlagerter statischer Torsion ( $\tau/\sigma = 0,2$ ); Überlebenswahrscheinlichkeit 50%

Anmerkung: Bei der Bewertung der Einflußparameter ist zu beachten, daß das im zweiten Balken von rechts dargestellte Versuchsergebnis sowohl einen Werkstoff- als auch einen Technologieeinfluß beinhaltet.

### 3. Sicherungsringverbindungen

Bei den meisten formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen ist zur axialen Fixierung bzw. zur Aufnahme von axialen Kräften ein formschlüssiges Verbindungselement erforderlich. Am weitesten verbreitet ist der Sicherungsring, landläufig auch Seegerring genannt. Leider sind zur Aufnahme der Ringe Nuten mit sehr kleinen Eckenradien notwendig. Ist die Anordnung dieser konstruktiv bedingten scharfen Kerben im direkten Kraftfluß nicht zu vermeiden, so sind diese die eigentlichen Schwachstellen der Welle, von denen Anrisse ausgehen können.

Im Auftrag der FVA wurden unter der Leitung von Prof. Beitz und Prof. Pahl mehrjährige theoretische und experimentelle Forschungsarbeiten mit dem Ziel der Ermittlung der Dauerschwingfestigkeit von Wellen mit Sicherungsringverbindungen durchgeführt. Heinrich /7/ hat mit Hilfe der FEM Formfaktoren für Wellen mit Rechtecknut berechnet (**Bild 4**). Bei Nutzug, d.h. bei belasteter Nutflanke sind erhebliche Einflüsse durch Radialkomponenten und flächigen Kraftangriff zu berücksichtigen. Für die Praxis wird die Rechtecknut mit max. möglichem Rundungsradius empfohlen.



**Bild 4:** Formfaktoren für ausgerundete Rechtecknuten in Wellen nach DIN 471. Gültig für  $m/t \geq 1,4$

Für die Berechnung von Kerbwirkungszahlen erwies sich die Theorie der Mikrostützwirkung nach Neuber /8/ als gut geeignet.

$$\rho_f = \rho + s \rho^* \quad (2)$$

Mit dem geometrisch vorgegebenem Krümmungsradius  $\rho$ , einem Faktor  $s$  der Mikrostützwirkung nach Neuber und der werkstoffabhängigen Ersatzstrukturlänge  $\rho^*$  wird ein fiktiver Krümmungsradius  $\rho_f$  berechnet. Daraus ist ein reduzierter Formfaktor  $\bar{\alpha}_k$ , z.B. mit

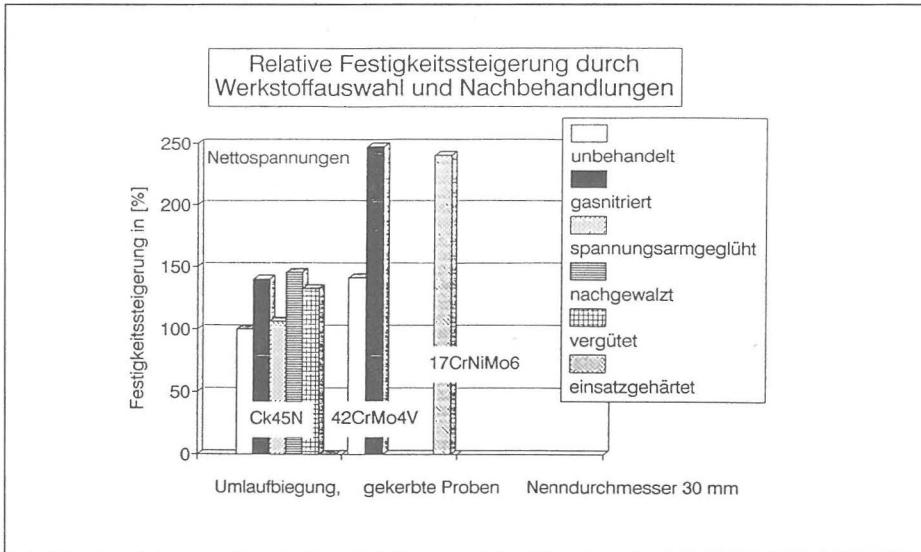
$$\bar{\alpha}_k = \alpha_k \sqrt{\frac{\rho}{\rho_f}} \quad (3)$$

zu ermitteln. Nach Neuber ist dieser Wert mit  $\beta_k$  identisch

$$\beta_{k\text{Neu}} = \bar{\alpha}_k \quad (4)$$

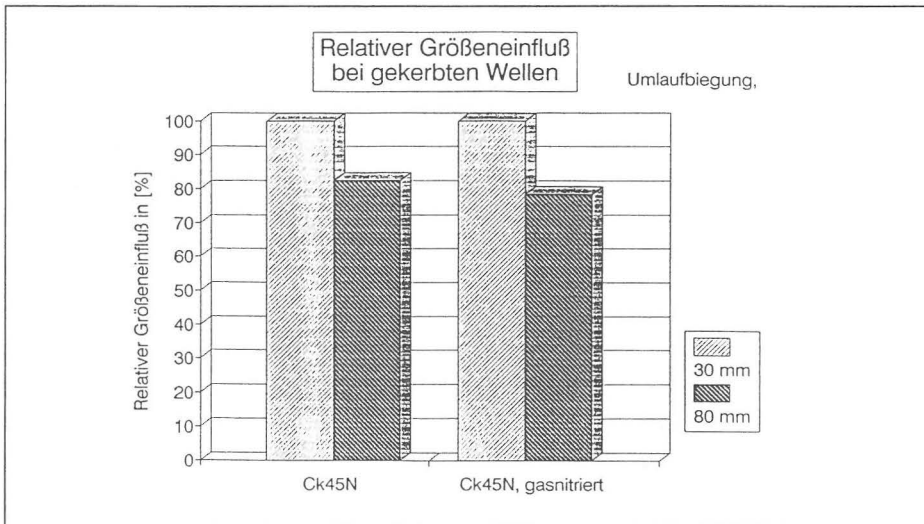
Heinrich hat verschiedene Berechnungsmöglichkeiten für  $\beta_k$  analysiert. Seine Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen von Pfeiffer /9/, der gekerbte Wellen aus Ck45 (Sicherungsringnut nach DIN 471) vorzugsweise einer Biegebe-

stung unterzogen hat. Meyer-Eschenbach /10/ hat diese Untersuchungen ausgedehnt auf die Wellenwerkstoffe 42CrMo4V und 17CrNiMo6. Darüber hinaus wurde der Einfluß technologischer und metallurgischer Verfahren auf die Dauerfestigkeit und der Größeneinfluß untersucht. **Bild 5** zeigt die relativen Festigkeitssteigerungen infolge Auswahl festerer Werkstoffe und infolge Nachbehandlung (Gasnitrieren und Einsatzhärten). Demnach ist durch den Einsatz einer gasnitrierter Welle aus 42CrMo4V gegenüber Ck45N eine 2,5fache Dauerfestigkeitssteigerung zu erreichen.



**Bild 5:** Festigkeitssteigerung von gekerbten Wellen ( $\varnothing 30$ ) durch Werkstoffauswahl und Nachbehandlungen

**Bild 6** verdeutlicht den Größeneinfluß bei Wellen mit Sicherungsringnuten. Bei den hier untersuchten Wellendurchmessern 30 mm und 80 mm beträgt dieser etwa 20%. Nachbehandlungen verstärken den Größeneinfluß, weniger scharfe Kerben dagegen vermindern ihn. Detailliertere Informationen sind dem sehr ausführlichen Abschlußbericht /10/ zu entnehmen.



**Bild 6:** Größeneinfluß bei nachbehandelten gekerbten Wellen

Zusammenfassend ist festzustellen, daß infolge der scharfen Kerbe Sicherungsringnuten nicht mit Stellen hoher Beanspruchung zusammenfallen sollten. Ist dies nicht zu vermeiden, so stehen für die Dimensionierung der Welle ausreichend genaue Berechnungsgleichungen und Werkstofffestigkeiten zur Verfügung. Heinrich /7/ und Raab /11/ geben zudem Gestaltungshinweise (z.B. Entlastungskerbten) zur Reduzierung der Spannungskonzentration in den Nuttecken.

#### 4. Preßverbindungen

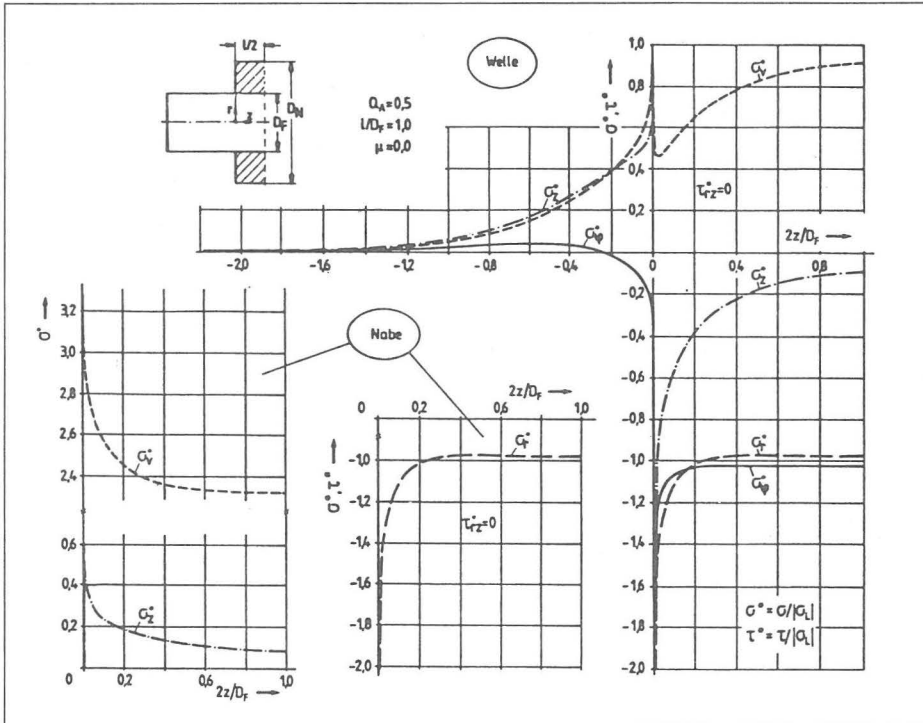
Preßverbindungen (PV) weisen einen hohen Volumen-Nutzwert  $\eta_T$  /1/ auf.

$$\eta_T = \frac{4 T_{zul}}{\pi D_F^3} \quad D_F = \text{Fügedurchmesser} \quad (5)$$

Sie sind bezüglich der Übertragung instationärer Drehmomente den formschlüssigen WNV eindeutig überlegen. Die aus Kostengründen zunehmende Leistungsdichte im Maschinenbau sowie die steigenden dynamischen Anforderungen an die Maschinenteile eröffnen den reibschlüssig und damit spielfrei wirkenden PV neue Einsatzgebiete; meist zu Lasten der Paßfederverbindung. Grenzen werden den PV durch die i.a. aufwendige Montage gesetzt. In schwer zugänglichen Räumen (z.B. geschlossene Getriebegehäuse), in Großgetrieben und an Elektromotorenwellen werden vorläufig die Paßfedern nicht zu verdrängen sein.

### a) Zylindrische Preßverbände

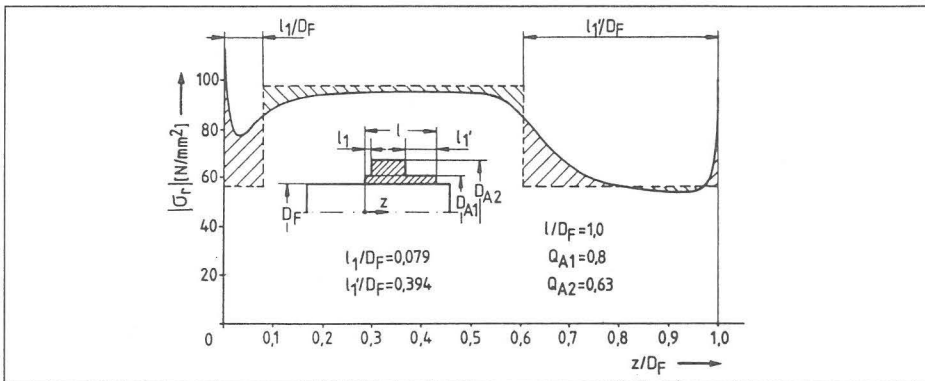
Die Auslegung zylindrischer Preßverbände erfolgt heute mit ausreichender Genauigkeit nach der Theorie des ebenen Spannungszustandes, d.h. konstanter Fugendruck entlang der Fuge. Leidich /12/ hat mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode den realen dreidimensionalen Spannungszustand ermittelt (**Bild 7**). Man erkennt den steilen Spannungsanstieg zur Nabenkante hin sowie das Auftreten einer dritten Spannung  $\sigma_z$ . Auf das statisch übertragbare Drehmoment haben die genannten Abweichungen vom ebenen Spannungszustand keinen nennenswerten Einfluß.



**Bild 7:** Bezogene Spannungen in der Fuge einer Preßverbindung mit glatter Welle.

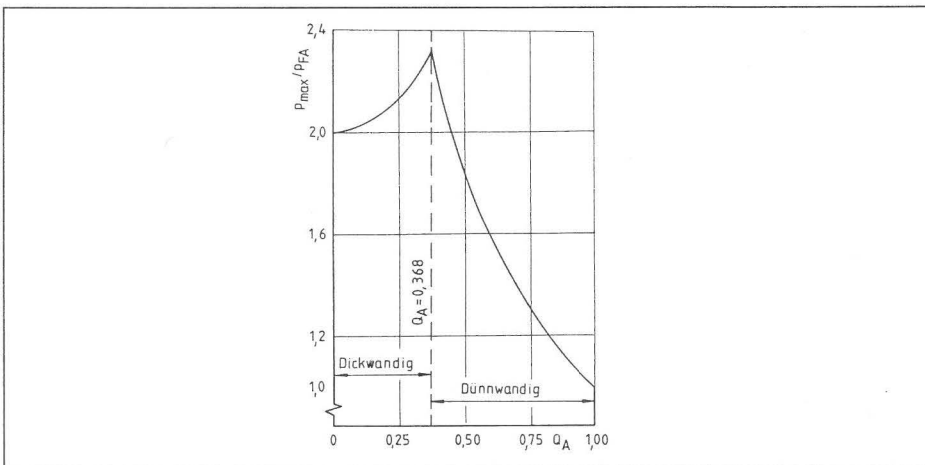
$\sigma_L$ : Fugendruck, berechnet nach der Theorie des ebenen Spannungszustandes

Zur Berechnung des übertragbaren Drehmomentes bzw. des Rutschmomentes einer PV mit gestuftem Nabenaußendurchmesser eignet sich die sogenannte Scheibchenmethode. Hierbei wird die PV im Bereich der Fuge in Scheiben konstanten Durchmessers eingeteilt und für diese dann die Fugenpressungen nach der Theorie des ebenen Spannungszustandes ermittelt. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der FE-Untersuchungen zeigt, daß hohe Genauigkeiten auch bei relativ grober Einteilung (d.h. wenigen Scheiben) erzielt werden. So z.B. beträgt bei der in **Bild 8** dargestellten Preßverbindung mit beidseitig abgesetzter Nabe der Fehler nur 4%, obwohl in den dünnwandigen Nabengebieten die theoretischen und realen Fugendrucke z.T. doch erheblich voneinander abweichen.



**Bild 8:** Fugendruck in der Fügefläche einer PV mit gestufter Nabe und Schema der Fugendruckberechnung mit Hilfe der Scheibchenmethode ( $\xi = 1,56\%$ ,  $\mu = 0$ )

Preßverbindungen werden überwiegend elastisch ausgelegt; d.h. die nach einer geeigneten Festigkeitshypothese aus den Spannungen  $\sigma_r$  und  $\sigma_{\varphi\varphi}$  (ebener Spannungszustand) gebildeten Vergleichsspannungen in der Welle und in der Nabe überschreiten die Streckgrenze des jeweiligen Werkstoffes nicht. Unter bestimmten Voraussetzungen können elastisch-plastische Beanspruchungen des Außen- und/oder Innenteils zugelassen werden (duktiler Werkstoff, Demontage nicht notwendig). Kollmann /1/ stellt dafür einfach zu handhabende Berechnungsgleichungen zur Verfügung, die inzwischen auch in die DIN 7190 eingeflossen sind. **Bild 9** verdeutlicht den Gewinn an Fugendruck und damit auch an übertragbarem Drehmoment durch elastisch-plastische Auslegung des Außenteils.



**Bild 9:** Gewinn an Fugendruck durch elastisch-plastische Auslegung des Außenteils /1/.  
 $p_{FA}$ : Elastischer Grenzfügendruck

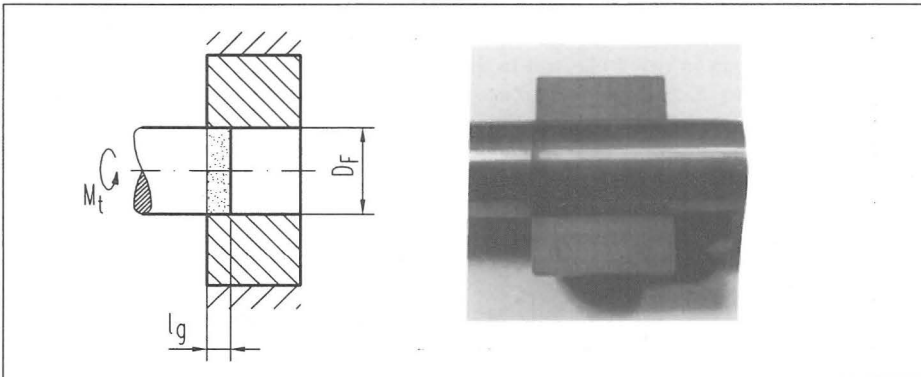
Für die Gestaltung instationär beanspruchter PV reicht die Betrachtung des ebenen Spannungszustandes allein nicht aus. Es ist zusätzlich sicherzustellen, daß die im Bereich der Nabenkante auftretenden Gleitbewegungen und die aus dem dort wirkenden dreidimensionalen Spannungszustand resultierende Wellenbeanspruchung vorgegebene Grenzwerte nicht überschreiten.

Leidlich /12/ gibt Gleichungen zur Berechnung zulässiger Grenzmomente an, bei denen noch kein signifikanter festigkeitsmindernder Einfluß der Reibung in der Gleitzone auftritt. Für die Wellendimensionierung (Welle ohne Absatz) gelten folgende Richtwerte

$$\beta_{ct} \approx 0,44 \sqrt[3]{D_F} \quad (D_F \leq 100 \text{ mm}) \quad (6)$$

$$\beta_{cb} \approx 2,2 \quad (D_F = 40 \text{ mm, St 50}) \quad (7)$$

Der Größeneinfluß ist bei Biegung noch nicht ausreichend erforscht. Eine Literaturswertung ist in /1/ und /12/ enthalten. Der Index c weist darauf hin, daß die angegebenen Kerbwirkungszahlen unter dem zusätzlichen Einfluß der Reibung in der Fuge (**Bild 10**) ermittelt wurden.



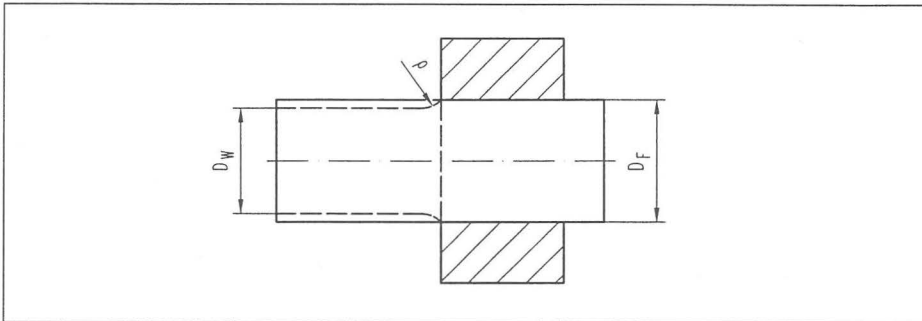
**Bild 10:** Gleitzone einer PV bei wechselnder Drehmomentbelastung (vergl. /19/)

Die wirksamste Maßnahme zur Erhöhung der Gestaltfestigkeit ist der Wellenabsatz direkt vor der Nabenkante. Als optimale Parameter werden

$$D_F / D_W \approx 1,1 \quad \text{und} \quad \rho / (D_F - D_W) \approx 2 \quad (8)$$

empfohlen. So z.B. unterscheiden sich die Gestaltfestigkeiten der in **Bild 11** gezeigten Preßverbindungen um etwa 25%. Wohlgemerkt zugunsten der Verbindung mit abgesetzter Welle! Ein möglicher Dauerbruch würde bei der Preßverbindung mit glatter Welle in der Gleitreibungszone direkt hinter der Nabenkante beginnen, bei der abgesetzten Welle dagegen im Übergangsradius.





**Bild 11:** Preßverbindung mit glatter Welle (—) und mit abgesetzter Welle (---)

#### b) Kegelpreßverbände

Schmidt /13/ hat umfangreiche theoretische Untersuchungen an Kegelpreßverbindungen (KPV) durchgeführt. Kollmann /1/ faßt die für die praktische Auslegung wichtigsten Gleichungen in einem Flußdiagramm zusammen. Kegelpreßverbindungen haben gegenüber den Zylinderpreßverbindungen entscheidende Vorteile bei der Montage. Der Aufschubweg beträgt nur wenige mm, so daß hohe Fugendrucke und damit eine gute Werkstoffausnutzung leicht erreichbar sind.

Neueste Untersuchungen von Meisel /14/ zeigen, daß zumindestens bei Wechseltorsion KPV mit elastisch-plastisch beanspruchten Naben bis zu 10% höhere Dauerfestigkeitswerte aufweisen als KPV mit rein elastischer Nabenbeanspruchung. Ob dies auf die geringeren Gleitwege oder auf die höhere statische Vorspannung zurückzuführen ist, ist noch nicht eindeutig geklärt.

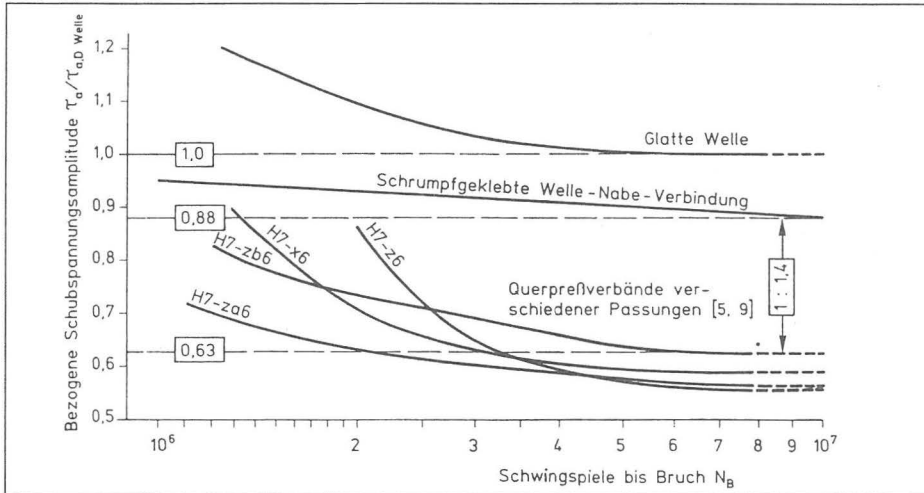
Zusammenfassend ist festzustellen, daß die von den Zylinderpreßverbindungen her bekannten Auslegungskennwerte in erster Näherung auch für selbsthemmende KPV (z.B. Kegerverhältnis 1:30 ... 1:50) gelten. Bemerkenswert auch die in /14/ gewonnene Erkenntnis, daß das bei PV übliche Schleifen der Welle, im Vergleich zum Feindreihen, infolge der eingebrachten Oberflächenspannungen zu einer Festigkeitsminderung führt.

## 5. Geklebte Welle-Nabe-Verbindungen

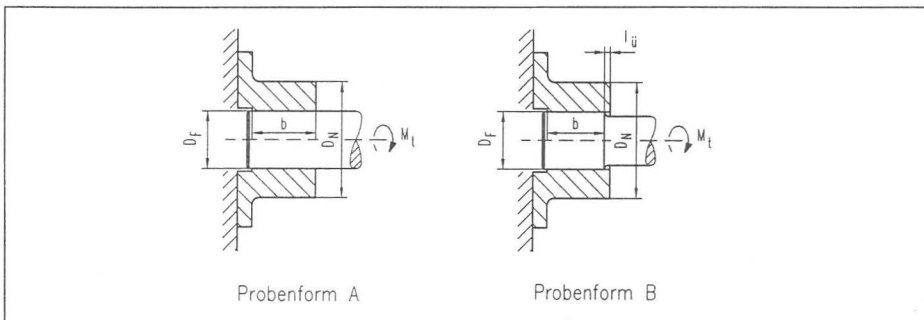
Der Begriff "geklebte Welle-Nabe-Verbindungen" umschließt alle WNV, bei denen der Stoffschluß durch einen Klebstoff erzeugt wird. Daher unterscheidet man zwischen **ausschließlich geklebten und geklebt / gepreßten** WNV. Bei den zuletzt genannten Verbindungen beträgt das optimale Übermaß zwischen Welle und Nabeninnendurchmesser bei Raumtemperatur etwa 0,2‰, somit ca. 10% der konventionellen Preßverbindungen. Zweckmäßigerweise wird das Übermaß so gewählt, daß die zum Fügen notwendige Erwärmung der Nabe nicht größer ist als die max. zulässige Aushärtetemperatur des Klebers (z.B. 180°C). Untersuchungen haben ergeben, daß Verbindungen mit leichtem Übermaß deutlich höhere Festigkeiten aufweisen als reine Klebverbindungen /15/.

Am Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik der Universität-GHS Paderborn und am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF) in Darmstadt wurden bzw. werden umfangrei-

che Untersuchungen an schrumpfgeklebten WNV bei Torsionsbelastung und Umlaufbiegung mit überlagerter statischer Torsion durchgeführt. **Bild 12** zeigt in einer Gegenüberstellung die Torsionswechselfestigkeit einer glatten Welle, einer schrumpfgeklebten WNV und unterschiedlicher Querpreßverbände (Probenform A, **Bild 13**).



**Bild 12:** Verlauf der Torsionswechselfestigkeit einer schrumpfgeklebten WNV und unterschiedlicher Querpreßverbände (St50) gegenüber einer glatten Welle

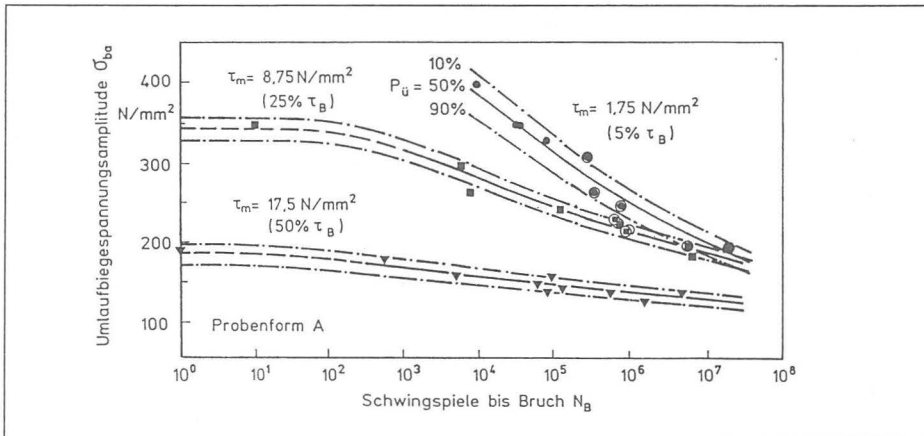


**Bild 13:** Probenformen

Es wird deutlich, daß die schrumpfgeklebte WNV um den Faktor 1,4 höhere Spannungsamplituden erträgt als herkömmliche Preßverbindungen. Die Kerbwirkungszahl (= Reziprokwert der bezogenen Spannungsamplitude) entspricht derjenigen einer Preßverbindung mit abgesetzter Welle (ähnlich Probenform B). Bei schrumpfgeklebten WNV ist durch die Probenform B dagegen keine nennenswerte Festigkeitssteigerung zu erreichen.

Die erreichbaren Spannungsamplituden im Dauerfestigkeitsbereich ( $> 10^7$  LW) sind bei anaeroben Klebern stark abhängig von der Mittelspannung. So z.B. beträgt die Spannungsamplitude bei  $R = -1$  67% der statischen Torsionsscherfestigkeit, bei  $R = 0,1$  dagegen nur noch 39% /16/. Aus den Untersuchungsergebnissen ist für die Wellendurchmesser 30 mm und 80 mm ein Größeneinflussfaktor von 1,3 abzulesen.

Die noch laufenden Untersuchungen in Paderborn und Darmstadt bestätigen den erheblichen Mittelspannungseinfluß auch bei biegebelasteten Klebverbindungen. In **Bild 14** ist der Einfluß



**Bild 14:** Wöhlerlinien für kombinierte Umlaufbiege- und konstante Torsionsbeanspruchung /17/ ( $D_w = 80\text{mm}$ ).

der konstanten Torsionsbeanspruchung auf die Umlaufbiegefestigkeit dargestellt. Der Einfluß nimmt mit zunehmender Lastwechselzahl ab und ist oberhalb  $10^7$  LW für  $\tau_m \leq 0,25 \tau_B$  ganz zu vernachlässigen. Tersch /17/ gibt einen Ansatz für ein empirisches Modell der Schwingfestigkeit bei kombinierter Umlaufbiegung und statischer Torsion an. Die bisher bekannten Versuchsergebnisse lassen sich im Mittel durch die Gleichung

$$\frac{\tau_m}{\tau_B} + \left( \frac{\sigma_{baD}}{\sigma_{bwD}} \right)^2 = 1 \quad (9)$$

wiedergeben.

- $\tau_m$  : konstante Torsionsbeanspruchung
- $\tau_B$  : Torsionsscherfestigkeit
- $\sigma_{baD}$  : Umlaufbiegespannung für  $10^7$  LW
- $\sigma_{bwD}$  : Umlaufbiegedauerfestigkeit

Die Gültigkeit ist zunächst auf den untersuchten Parameterbereich beschränkt. Eine darüber hinausgehende Anwendung wird erwartet.

Bei allem Respekt vor der Qualität der heutigen Klebstoffe ist doch kritisch anzumerken, daß die vorstehenden Aussagen über die Dauerhaltbarkeit nur den Bereich bis  $10^7$  LW betreffen. Im Gegensatz zu anderen WNV verläuft hier die Wöhlerlinie aber noch nicht waagrecht. Demnach werden im praktisch interessanten Bereich um  $10^8$  LW die zulässigen Spannungsamplituden (deutlich?) niedriger liegen als die bisher ermittelten.

Vorsicht ist auch geboten beim Einsatz von Klebverbindungen in Öl und unter hoher Umgebungstemperatur. Am WZL in Aachen wurden praxisnahe Untersuchungen /18/ mit klebgeschrumpften Zahnrädern in Getrieben durchgeführt. Allein die Temperaturerhöhung von  $80^\circ\text{C}$  auf  $100^\circ\text{C}$  führte beim Kleber Loctite 15250 zu einem Dauerfestigkeitsabfall von nahezu 50%.

Trotz alledem sind weiterführende Untersuchungen auf diesem Gebiet wünschenswert. Sollte es gelingen, die Klebstoffhersteller stärker in die Forschung einzubinden und deren Bewußtsein für den Maschinenbau zu stärken, dann werden geklebte WNV bald nicht mehr zu den Exoten gehören, die man punktuell nur dort einsetzt, wo sonst nichts mehr geht. Die gegenüber Preßverbindungen einfachere Demontage eröffnet diesen ein beträchtliches Einsatzpotential. Was derzeit fehlt, sind gesicherte Auslegungsgleichungen und bezüglich der Oberflächenvorbereitung weniger empfindliche Klebstofftypen.

## 6. Zusammenfassung

Die vorstehenden Ausführungen geben einen Überblick über die Forschungsleistungen deutscher Hochschulen auf dem Gebiet der Welle-Nabe-Verbindungen innerhalb der letzten 10 Jahre. Sie sind ohne Übertreibung als weltweit führend zu bezeichnen.

Die überwiegend praxisnahe Forschung, i.d.R. begleitet von einem Arbeitskreis mit Experten aus der Industrie, garantiert eine schnelle Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis. Sie ermöglichen einerseits die Reduzierung von Sicherheitsfaktoren und damit eine höhere Ausnutzung konventioneller WNV. Andererseits werden bisher nur am Rande erwähnte WNV, wie Schrumpfklebe- und Polygon-Verbindungen /20/ einer fundierten Berechnung zugeführt und damit die Grundlagen für einen vermehrten und wirksamen Einsatz in der Industrie geschaffen.

## Literaturverzeichnis

- /1/ Kollmann, F.G.  
Welle-Nabe-Verbindungen,  
Springer-Verlag 1984

- /2/ Klein, Stephan  
Rechnerunterstützte Auslegung von Welle-Nabe-Verbindungen als Beispiel der Anwendung standardisierter Konstruktionskomponenten  
Dissertation TU Berlin, 1994
- /3/ Raab, W.; Günther, V.  
Ermittlung der Dauerhaltbarkeit von Paßfederverbindungen  
Lfd. Forschungsvorhaben, FVA-Nr. 217
- /4/ Militzer, O.  
Exakte Berechnung von Wellen-Naben-Paßfederverbindungen  
Forschungsheft Nr. 26, FVA, 1975
- /5/ Raab, W.; u.a.  
Beanspruchungen in Paßfederverbindungen  
Teil I: Paßfederverbindungen unter Torsionsbelastung  
Antriebstechnik 31(1992) H. 6, S. 69-73
- /6/ Raab, W.; u.a.  
Beanspruchungen in Paßfederverbindungen  
Teil II: Paßfederverbindungen unter Biegebelastung  
Antriebstechnik 31 (1992) H. 7, S. 55-59
- /7/ Heinrich, J.  
Kerbwirkung an Sicherungsringnuten und Berechnung von Sicherungsringverbindungen  
Dissertation TH Darmstadt, 1984
- /8/ Neuber, H.  
Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsrechnungen  
Konstruktion 20 (1968) H. 7, S. 245 - 251
- /9/ Pfeiffer, B.  
Einfluß von Sicherungsringverbindungen auf die Dauerfestigkeit dynamisch belasteter Wellen  
Dissertation TU Berlin, 1985
- /10/ Beitz, W.; Meyer-Eschenbach, A.  
Dauerschwingfestigkeit von Wellen mit Sicherungsringverbindungen für Werkstoff-, Nachbehandlungs- und Fertigungsverfahren  
FVA, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 79/III, 1992
- /11/ Raab, W.  
Sonderprobleme bei spannungsoptischen Untersuchungen von Maschinenteilen  
Dissertation TH Darmstadt, 1961

- /12/ Leidich, E.  
Beanspruchung von Preßverbindungen im elastischen Bereich und Auslegung gegen Dauerbruch  
Dissertation TH Darmstadt, 1983
- /13/ Schmid, E. A.  
Theoretische und experimentelle Untersuchung des Mechanismus der Drehmomentübertragung von Kegel-Preß-Verbindungen  
Fortschr. Ber. VDI-Z., Reihe 1, Nr. 16 (1969)
- /14/ Meisel, D.  
Untersuchung zur Gestaltfestigkeit und zur Fugendruckverteilung von Kegelpreßverbindungen  
Institut für Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, Dresden  
Lfd. Forschungsvorhaben, FKM-Nr.: 691531, AIF-Nr.: D 153
- /15/ Grunau  
Mechanisches Verhalten klebgeschrumpfter und geklebter Welle-Nabe-Verbindungen  
Dissertation Universität GHS Paderborn, 1987
- /16/ Berg, M.  
Zum Festigkeitsverhalten schrumpfgeklebter Welle-Nabe-Verbindungen unter Torsionsbelastung  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt  
Dissertation TU München, 1989
- /17/ Tersch, H.  
Schwingfestigkeit schrumpfgeklebter Welle-Nabe-Verbindungen unter Torsions- und Umlaufbiegebelastung  
Konstruktion 45 (1993) S. 271 - 274
- /18/ Weck, M.; Krick, H.  
Geklebte und schrumpfgeklebte Welle-Nabe-Verbindungen unter besonderer Berücksichtigung der Anwendung im Maschinenbau  
Lfd. Forschungsvorhaben, FKM, AIF-Nr. 123/90
- /19/ Gropp, H.; Klose, D.  
Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Bestimmung der Länge von Gleitzonen sowie der Drehmomentübertragungsfähigkeit dynamisch belasteter Preßverbände bei axialer Ableitung des Drehmomentes.  
Abschlußbericht für die Deutsche Forschungsgemeinschaft zum Forschungsvorhaben Ko 643/39-1 mit dem Kennwort "Gleitzonen" (Bericht zum experimentellen Teil) 1993
- /20/ Göttlicher, C.  
Festigkeitsuntersuchungen von genormten und optimierten Polygon-Welle-Nabe-Verbindungen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente  
eingereichte Dissertation TH Darmstadt, 1994

# **Zum Verhältnis von Fachdisziplin und Berufspädagogik in der Gewerbelehrrerausbildung**

**von Josef Rützel**

Seit dem Wintersemester 1963/64, also seit 30 Jahren, werden an der TH Darmstadt Gewerbelehrerinnen und Gewerbelehrer ausgebildet. Zuvor fand deren Ausbildung am Berufspädagogischen Institut in Frankfurt statt.

## **Akademisierung in den sechziger Jahren**

Gesellschaftliche Wandlungs- und Modernisierungsprozesse führten dazu, daß sich die Akademisierung der Gewerbelehrrerausbildung in den 50er und 60er Jahren sukzessiv durchsetzte. Durch die forcierte Industrialisierung beschleunigten sich der technologische und gesellschaftliche Wandel. In diesem Wandlungsprozeß wurde der beruflichen Qualifizierung eine erhöhte ökonomische und wirtschaftspolitische Bedeutung beigemessen. Steigende berufliche Anforderungen waren die Folge dieser Entwicklungen.

Die Berufsschullehrer und Lehrerinnen waren jedoch nur unzureichend auf diese neuen Anforderungen vorbereitet. Volksschullehrer, Techniker, Meister und Fachschulingenieure mit Zusatzausbildung und Absolventen der Berufspädagogischen Institute bildeten seinerzeit die Berufsschullehrerschaft. Eine Verbesserung der Qualität der Ausbildung und die Sicherung des Berufsschullehrernachwuchses waren dringend erforderlich. Sie schienen am ehesten durch ein Universitätsstudium gewährleistet werden zu können. Doch auch standespolitische Interessen der Gewerbelehrer, sie wollten eine Gleichstellung mit den Gymnasial- und Handelslehrern erreichen, spielten für die Forderung nach Akademisierung der Ausbildung eine nicht unerhebliche Rolle.

Es liegt auf der Hand, daß die Verlagerung der Ausbildung an die Universitäten, also auch die Einrichtung des Studiums an der TH Darmstadt, von vielen Diskussionen über Konzepte, die Anbindung an Fachdisziplinen, die Einrichtung von neuen Stellen und zur angemessenen Sachausstattung begleitet war. Die Stelle von Herrn Professor Raab wurde für diesen Studiengang neu eingerichtet. Ich selbst bin einer der frühen Absolventen dieses Studiengangs und habe bei Herrn Raab studiert. Den Eingliederungsprozeß und dessen Ergebnis kann ich hier nicht nachzeichnen. Wir haben ihn in einer Dokumentation festgehalten, die wir anläßlich der von uns veranstalteten Fachtagung "30 Jahre Gewerbelehrrerausbildung an der TH Darmstadt" herausgegeben haben.

## Fachdisziplin und Berufspädagogik

Im Verlauf der letzten 30 Jahre, stellten sich Strukturprobleme im Gewerbelehrerstudium heraus, die sich durch die beschleunigten technologischen, arbeitsorganisatorischen und gesellschaftlichen Wandlungsprozesse der 80 Jahre gravierend verschärften.

Besonders problematisch ist die strukturelle Inkongruenz zwischen den Erkenntnisinteressen, Fragestellungen und Methoden der wissenschaftlichen Disziplinen einerseits und den benötigten Erfahrungs-, Wissens- und Handlungskompetenzen zur Bewältigung berufsförmig organisierter Arbeit andererseits. Es geht mit anderen Worten um das Verhältnis von Theorie und Praxis, das nicht nur im Gewerbelehrerstudium von Bedeutung ist. In den Konzeptionen zum Gewerbelehrerstudium geht man davon aus, daß das Studium der Fachwissenschaft dazu befähigt, die Berufspraxis zu erklären. Das ingenieurwissenschaftliche Studium kann jedoch nur dazu beitragen technische Sachverhalte zu erklären, aber nicht die Berufspraxis, die nach anderen "Gesetzen" funktioniert. Diese Aussage trifft nicht nur auf die Gewerbelehrer zu, sondern in abgeschwächter Form auch für angehende Ingenieure und alle anderen Berufe bzw. Disziplinen. Welches die angemessene Fachwissenschaft ist, wird auch für Ingenieure zunehmend fraglich. Für die Gewerbelehrer kommt erschwerend hinzu, daß sie nur "ein halbes Ingenieurstudium" absolvieren, das durch ein weiteres Fach sowie die Erziehungs- und Gesellschaftswissenschaften ergänzt wird. Jede dieser Disziplinen entwickelt ihre eigene Dynamik, der innere Zusammenhang des Studiums wird dadurch gesprengt. Für die Studierenden werden Sinn und Bedeutung der von ihnen geforderten Leistungen bezogen auf ihr Berufsprofil nicht nachvollziehbar, manchmal sind diese wohl auch nicht vorhanden. Es fehlt im Studium der Ort, wo diese Orientierung erfolgen kann und die Studieninhalte in ein Ganzes gebracht werden können.

Von der Berufspädagogik als Disziplin werden diese Fragen zwar bearbeitet und erforscht. Untersucht werden unter anderem das Verhältnis von wissenschaftlichen und beruflichen Strukturen bzw. Anforderungen sowie von individuellen und gesellschaftlichen Prozessen im Hinblick auf berufliche Bildung. Diese Erklärungen bleiben aber für die Studierenden abstrakt, da sie nicht auf der Erfahrungsebene mit den ingenieurwissenschaftlichen Studieninhalten verknüpft werden können. Zudem sind sie auch wegen der unzureichenden Verankerung der Berufspädagogik im Studium unzureichend.

Eine zentrierende Funktion könnte auch die Fachdidaktik übernehmen. Doch auch sie wurde im Studium zurückgedrängt. Sie wurde zeitlich und inhaltlich stark begrenzt. Personelle- und Forschungsressourcen sind hier so gut wie nicht vorhanden.



## Entwicklung in den achtziger Jahren

Die Entwicklungen in den achtziger Jahren haben diese Probleme verstärkt. Der sich beschleunigende Wissenszuwachs in den einzelnen Disziplinen hat einerseits zu deren Ausdifferenzierung und andererseits zur Auflösung von Disziplinengrenzen und Überlappungen mit anderen Disziplinen geführt. Einerseits sind immer spezialisiertere Verfahren, Kenntnisse und Theorien erforderlich, andererseits lassen sich viele Probleme nur noch interdisziplinär angehen. Ein Beispiel für diese Entwicklung ist die Veränderung des Stellenprofils von Professor Raab von "Maschinenelemente und Mechanik" zu "Mechatronische Systeme im Maschinenbau".

Grundlegende Veränderungen sind zudem in den Arbeitsformen zu beobachten. Teamarbeit, Lean Production und Lean Management stehen heute im Vordergrund. Allgemein gewinnen neben fachlichen soziale und personale Qualifikationen an Bedeutung.

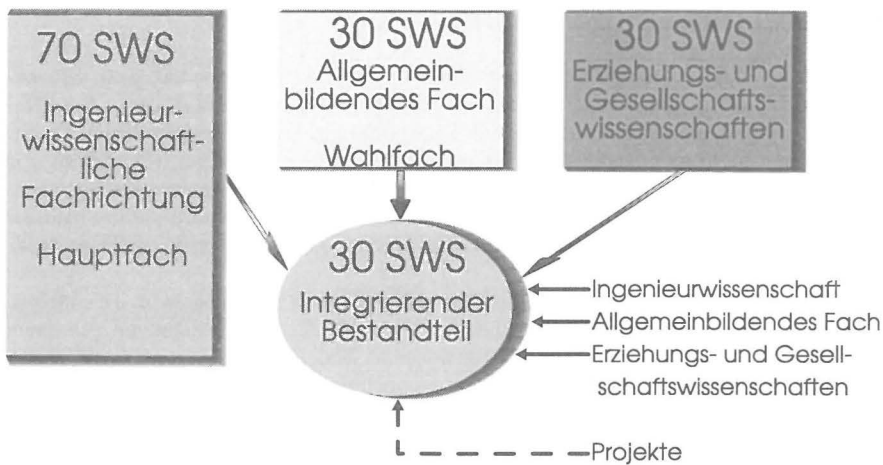
Unübersehbar sind schließlich auch die Differenzierungen und Veränderungen in den Haltungen, Lernformen, Interessen und Perspektiven der nachwachsenden Generation. Die Lern-, Aneignungs- und Handlungsformen sind differenzierter, individualisierter und komplexer geworden. Die Heterogenität der Studierenden und Auszubildenden ist erheblich gestiegen und läßt sich auch durch äußere Maßnahmen nicht mehr zurückdrehen. Aus pädagogischer Sicht und im Hinblick auf gesellschaftliche Entwicklungen ist auf diese veränderten subjektiven Voraussetzungen zu reagieren.

Schließlich sind parallel zu diesen Veränderungen auch die Studien- und Ausbildungsmethoden vielfältiger und komplexer geworden. Die Lehrenden benötigen heute eine größere Methodenkompetenz.

## Neukonzeption des *Darmstädter Gewerbelehrerstudiums*

Unbestritten ist heute, daß die hier nur in groben Strichen skizzierten Entwicklungen zum Nachdenken über die Studienorganisation, -inhalte und -formen zwingen. Strukturelle Veränderungen im Studium und Verbesserung der Lehre sind heute landauf, landab im Gespräch, nicht nur bezogen auf das Gewerbelehrerstudium. Für ein an der Professionalisierung künftiger Gewerbelehrer und Gewerbelehrerinnen orientiertes Gewerbelehrerstudium an der TH Darmstadt halten wir vor allem einen integrativen Anteil im Studium für erforderlich.

Beim Studienumfang und der Studienstruktur gehen wir von den derzeit bestehenden Richtwerten aus, die einen Studienumfang von 160 SWS und deren Aufteilung von 80 SWS für die berufliche Fachrichtung, 40 SWS für die Wahl- bzw. Zweitfach und 40 SWS für das Erziehungs- und gesellschaftswissenschaftliche Studium vorsehen. Nach der neuen Studienstruktur sollten davon je 10 SWS in einem integrativen Anteil studiert werden. Demnach würde die neue Studienstruktur vier zu studierende Bestandteile enthalten: 70 SWS berufliche Fachrichtung, 30 SWS Wahl- bzw. Zweitfach, 30 SWS Erziehungs- und Gesellschaftswissenschaften und 30 SWS integrative Studien (vgl. Schaubild).



Im integrativen Studienanteil sollen die jeweiligen fachlichen Studien ergänzt, fortgeführt und aufeinander bezogen werden. Die bisher fehlende Verbindung zwischen den verschiedenen Studienanteilen soll systematisch hergestellt und im Studium verankert werden, indem technische Inhalte des Studiums, Inhalte des Wahlfaches und der Erziehungs- und Gesellschaftswissenschaften an gemeinsamen Fragestellungen fachübergreifend erarbeitet oder auf konkrete Vorhaben bzw. Projekte bezogen werden. Den Schwerpunkt sollen Lernformen bilden, die die handelnde, möglichst selbstgesteuerte Aneignung der Inhalte, die selbständige Organisation von Gruppenprozessen, Selbsterfahrung und Selbstreflektion in den Vordergrund rücken. Die durchgeführten Projekte und Vorhaben sollen auf die im Studium angeeigneten Theorien rückbezogen und von diesen aus beurteilt werden. Umgekehrt sollen die Theorien ihrerseits auf die Praxis bezogen und auf deren Hintergrund konkretisiert werden.

Die Installierung eines integrativen Studienelements hat Rückwirkungen auf die Organisation und inhaltliche Ausgestaltung des ingenieurwissenschaftlichen Fachgebietes und des Wahlfachs. In diesen ist zwar keine vollkommene Neuorganisation erforderlich, weil die Gestaltung des integrativen Anteils von den bestehenden Studienordnungen ausgeht. Dennoch werden neue inhaltliche Schwerpunktsetzungen und möglicherweise auch neue Lernformen notwendig werden, wobei selbstverständlich die Spezifika der einzelnen Fachgebiete zu berücksichtigen sind.

Wegen der zunehmenden Differenzierungsprozesse sollte das derzeit vorhandene breite Angebot an Wahlfächern bestehen bleiben. Notwendig wäre es, dieses Angebot durch neue Schwerpunkte zu ergänzen, für die ein großer Bedarf besteht und für deren Entwicklung es in Darmstadt gute Voraussetzungen gibt. Denkbar wären hier die Schwerpunkte "Berufliche Bildung besonderer Zielgruppen" und "Berufliche Weiterbildung".

# Die Druckmaschine als informationsverarbeitendes System

von Klaus Wolf

Druckmaschinen sind informationsverarbeitende Systeme im doppelten Sinn. Einmal verarbeiten sie Informationen zur Steuerung ihrer Funktionen und Abläufe, wie dies in jedem anderen technischen System geschieht. Andererseits gehören Druckmaschinen zum Bereich der Printmedien. Sie sind damit Teil einer informationsverarbeitenden Verfahrenskette, die von der Vorlage zur Reproduktion, letztlich zu einem Druckprodukt (Buch, Zeitung, Zeitschrift, Katalog) führt. Im folgenden wird auf die Informationsverarbeitung beim Druckprozeß eingegangen, die am Beispiel der Bogenoffsetdruckmaschinen von MAN Roland dargestellt wird.

**Abb. 1:** Schema des Druckprozesses (siehe Anlage)

Der Druckprozeß kann vereinfachend wie folgt beschrieben werden: Ausgehend von einer Vorlage werden bei einem Farbbild in der sogenannten Vorstufe in mehreren Schritten Druckplatten für die Teilfarben Schwarz, Cyan, Magenta und Gelb erstellt. Die Druckplatten werden in die Druckmaschine eingespannt. Während des Druckvorgangs werden die Druckplatten eingefärbt und die Farbe auf den Bogen übertragen. Es entsteht eine Reproduktion der Vorlage. Die Druckmaschine hat dabei die Aufgabe, diese Reproduktion mit möglichst hoher Wiedergabequalität und Geschwindigkeit herzustellen.

**Abb. 2:** Bogendruckmaschine R 700

**Abb. 3:** Schema des Bogenlaufs einer Bogendruckmaschine R 704

Eine derartige Bogendruckmaschine druckt bei einem Durchlauf des Bogens im allgemeinen mehrere Farben hintereinander, z. B. vier für den Farbendruck. Je nach Ausstattung sind zwischen zwei und acht Druckwerken je Druckmaschine möglich. Die maximale Druckgeschwindigkeit liegt bei etwa 4 m/s. Dies entspricht bei einem Papierformat von 70 x 100 cm einer Leistung von 15000 Bogen pro Stunde. Der zu bedruckende Bogen besteht meistens aus Papier (80 bis 135 g/m<sup>2</sup>) oder Karton (250 bis 400 g/m<sup>2</sup>). Typische Auflagenhöhen für den Bogendruck liegen heute zwischen 10000 und 30000 Bogen. Für größere Auflagen (Zeitungen, Zeitschriften) werden Rollendruckmaschinen eingesetzt, die mit Druckgeschwindigkeiten von 10 bis 15 m/s laufen und dabei Leistungen bis 80000 Exemplare pro Stunde erreichen.

**Abb. 4:** Rollendruckmaschine

Während des Druckprozesses in der Druckmaschine werden Informationen übertragen. Kennzeichen moderner Druckmaschinen sind dabei eine hohe Datenrate und eine hohe Über-

tragungsgüte. Die hohe Datenrate entspricht einem großen Ausstoß von Drucken pro Zeiteinheit, d. h. einer hohen Druckgeschwindigkeit. Dagegen erfordert eine hohe Übertragungsgüte eine hohe Druckqualität. Dies soll im folgenden näher erläutert werden.

**Abb. 5:** Datenratenvergleich (siehe Anlage)

Die Datenrate gibt die pro Zeiteinheit übertragenen Informationen in Bit pro Sekunde an. Wird die Datenrate verschiedener informationsverarbeitender Systeme verglichen, so zeigt sich, daß die Druckmaschine mit bis zu 23 GBit pro Sekunde einen enorm hohen Informationsdurchsatz hat. Auch modernste High Speed Laserdrucker liegen bei der Datenrate um den Faktor 1000 niedriger.

Bei der Betrachtung der Übertragungsgüte stellt sich zunächst die Frage, wie die Information technisch koordiniert wird.

Wie eingangs schon erwähnt, werden beim Farbdruk vier Druckplatten mit den Teilfarben Schwarz, Cyan, Magenta und Gelb erzeugt. Bei dem heute weit verbreiteten Offsetdruck wird das Teilbild auf jeder Druckplatte autotypisch aufgerastert. Wählt man beispielsweise einen 60er Raster, so erhält man  $60 \times 60 = 3600$  Bildpunkte pro Quadratzentimeter. Innerhalb eines Bildpunktes erreicht man eine Abstufung der Farbintensität durch Veränderung der Größe des einzelnen Rasterpunktes bei konstanter Farbschichtdicke.

**Abb. 6:** Einfarbenrasterbild

Der kleinste übertragbare Rasterpunkt hat einen Durchmesser von 0,01 mm. Variiert man die Fläche des Rasterpunktes, so entsteht im menschlichen Auge aus der Mischung der Farbreize von Rasterpunkten und Papierweiß ein Farbeindruck unterschiedlicher Helligkeit. Der moderne Offsetdruck ermöglicht eine Übertragung von maximal  $256 = 2^8$  Helligkeitsstufen, also die Übertragung eines Informationsgehaltes von maximal 8 Bit pro Bildelement und Teilfarbe.

**Abb. 7:** Mehrfarbenrasterbild

Beim Zusammendruck der vier Teilfarben entsteht das fertige Farbbild. Dabei kann ein Informationsgehalt von maximal  $4 \times 8 \text{ Bit} = 32 \text{ Bit}$  pro Bildelement übertragen werden. Dies entspricht  $2^{32}$ , also etwa 4,3 Milliarden, unterschiedlichen Farben.

In der Vorstufe wird ausgehend von der Vorlage pro Teilfarbe eine Druckplatte hergestellt, welche die Teilinformation in Form von Rasterpunkten unterschiedlicher Größe enthält.

**Abb. 8:** Schema Offsetdruckwerk

Im Druckwerk einer Druckmaschine wird die Farbe auf den Bogen übertragen. Beim Offsetprozeß wird hierzu die auf den Plattenzylinder aufgespannte Druckplatte eingefärbt. Zuvor wird die Platte durch einfeuchten mit einer Wasseralkoholmischung so präpariert, daß nur die Rasterpunkte Farbe von den Farbwerken annehmen. Die Farbe wird nun zunächst an den mit

einem elastischen Gummituch bespannten Gummizylinder übertragen, bevor sie von diesem endgültig auf den Bogen gelangt. Das Zwischenschalten eines Gummizylinders ist typisch für den Offsetdruck. Dadurch erreicht man eine Vergleichmäßigung des Anpreßdruckes über die Maschinenbreite. Die Druckplatte kommt nicht mit der manchmal rauen Oberfläche des Bogens in Berührung, was die Standzeit der Druckplatte erhöht. Schließlich ermöglicht das Gummituch das Bedrucken von strukturierten Oberflächen.

Bei der Farbübertragung von der Druckplatte zum Bogen werden die Rasterpunkte vergrößert. Bezeichnet man das Verhältnis der Rasterpunktfläche zur Gesamtfläche des Bildes mit Rastertonwert  $F$ , so ergibt sich eine Übertragungskennlinie.

**Abb. 9:** Definition Rastertonwert  $F$  (siehe Anlage)

**Abb. 10:** Übertragungskennlinie

Während des Druckprozesses treten prozeßbedingte Schwankungen des Rastergrößen auf, die zu Informationsverlusten und somit auch zu einer Verringerung der Druckqualität führen können. Hauptursache hierfür sind Dreh- und Biegeschwingungen der beteiligten Zylinder. Diese Verursachen minimale Verformungen der Rasterpunkte während der Farbübertragung, die das Auge als Farbschwankungen erkennt. Wenn man bedenkt, daß sehr feine Rasterpunkte mit 0,01 mm Durchmesser übertragen werden müssen, so erkennt man, daß die zulässigen Schwankungen nur wenige  $\mu\text{m}$  betragen dürfen und dies bei Zylinderabmessungen von beispielsweise 300 mm Durchmesser und 1000 mm Ballenbreite. Die Anforderungen an die Steifigkeit und Rundlaufgenauigkeit der Zylinder, des Antriebs, der Lagerungen sowie an die Qualität der Zahnräder sind entsprechend hoch.

Die Forderung an die Druckmaschinenbauer lautet daher: Alle Elemente, die im unmittelbaren Zusammenhang mit der Farbübertragung und dem Transport des Bogens von Druckzone zu Druckzone innerhalb der Druckmaschine stehen, müssen so steif ausgelegt werden, daß die Farbe und damit die Information mit möglichst hoher Geschwindigkeits- und Übertragungsgüte an den Bogen übertragen werden kann. Dies soll im folgenden an einigen Beispielen erläutert werden.

**Abb. 11:** Schema Druckwerk

Um die Verzerrung der Rasterpunkte bei der Übertragung von der Druckplatte über das Gummituch auf den Bogen minimal zu halten, d. h. auf wenige  $\mu\text{m}$  zu beschränken, müssen Rundlauf und Abwicklung von Antriebsrädern und Zylinderballen möglichst ideal sein. Dies bedeutet in der Praxis Zahnräder im Antrieb mit der Qualität 1 bis 2, Zylinder mit Rundlauf Fehlern von wenigen  $\mu\text{m}$  oder Einsatz sogenannter Schmitzringe auf Platten- und Gummizylinder, um durch eine direkte mechanische Kopplung tangential Reaktionsbewegungen in der Druckzone Druckplatte/Gummituch weitgehend auszuschalten.

Es ist leicht nachvollziehbar, daß für eine einwandfreie Farbübertragung auch die Durchbiegung der Zylinder in engen Grenzen gehalten werden muß. Die Liniendrücke liegen typischerweise bei etwa 100 N/cm. Damit ergeben sich bei einer Zylinderballenbreite von 100 cm Kräfte in der Größenordnung von 10000 N. Bei einer zulässigen Durchbiegung von

wenigen  $\mu\text{m}$  müssen hohe Anforderungen an die Biegesteifigkeit der Zylinder bzw. Steifigkeit der Lager gestellt werden.

Um einen einwandfreien Farbdruck zu erhalten müssen die einzelnen Teilfarben im  $\mu\text{m}$ -Bereich passgenau aufeinander gedruckt werden. Geschieht dies nicht, so wird das Bild unscharf. Beim Offsetdruck treten zudem noch Farbverschiebungen auf, die vom Betrachter als störend empfunden werden. Dies gilt insbesondere bei Hauptfarben und hellen Farbtönen. Die Forderung nach passgenauem Druck bedeutet eine hohe Wiederholgenauigkeit bei der Bogenübergabe von einem Greifersystem auf das nächste und eine hohe Steifigkeit des Antriebsstranges. Ein Hauptaugenmerk muß dabei auf die konstruktive Gestaltung von Zahnrädern, Lagern und Übertragungssystemen gelegt werden.

**Abb. 12:** Antrieb R 700

Wenn in den bisherigen Ausführungen von der erforderlichen hohen Steifigkeit der an der Farbübertragung und am passgenauen Bogentransport beteiligten Bauteile die Rede war, so gilt dies nicht nur für die statische sondern im besonderen Maß auch für die dynamische Betrachtung. Druckmaschinen sind schwingungsfähige Gebilde, deren Schwingungszustand im Druckbild sichtbar werden kann. Ähnlich der Rattermarken beim Schleifen von Werkstücken erkennt unser Auge auf dem Druckbogen kleinste Verzerrungen der Rasterpunkte als deutlich sichtbare Farbschwankungen.

**Abb. 13:** Farbschwankungen

Hohe Druckgeschwindigkeiten und hohe Druckqualitäten erfordern einen Maschinenbau, dessen Präzision im oberen Qualitätssegment des Werkzeugmaschinenbaus angesiedelt ist. Solange Druckprodukte wie Zeitungen, Zeitschriften und Kataloge in hoher Druckqualität, ausreichend hoher Auflage und in kurzer Produktionszeit hergestellt werden müssen, werden Bits mit Stahl und Eisen eine für den Ingenieur faszinierende Verbindung eingehen.

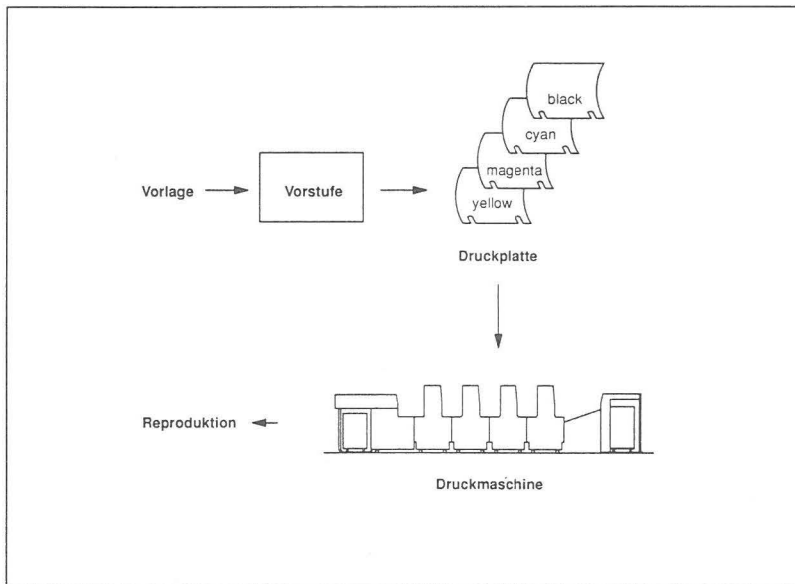
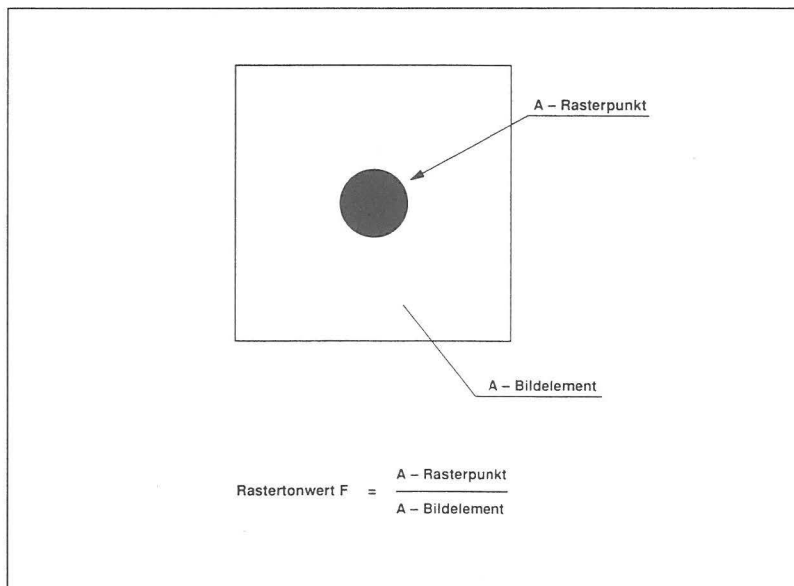


Abb. 1: Schema des Druckprozesses

Obergrenzen der Druckgeschwindigkeit		Konventionelle Druckmaschine	Elektronischer Drucker
Prozess m/s		~ 20	~ 2
Papier m/s		~ 1.5 - 15	≤ 0.75
Seiten S/s	Bogen	~ 10 - 70	≤ 4
	Rolle	~ 100 - 1 000 *	
Druck-Datenrate Mbit/s		~ 25 000 und darüber	~ 50 **
Datenrate Umrüsten Mbit/s		~ 0.3	~ 50 **

\* Geschwindigkeitsengpass Weiterverarbeitung (z.B.: Falzapparat)  
 \*\* PC Taktfrequenz

Abb. 5: Datenratenvergleich



**Abb. 9:** Definition Rastertonwert F



# Eisenbahntechnik im Wandel der Zeit

von Uwe Breitmeier

## Einleitung

Damit die Technik im Wandel der Zeit dargestellt werden kann, bedarf es eines Rückblickes in die Vergangenheit. Eisenbahntechnik der Vergangenheit wird im Eisenbahnmuseum Darmstadt - Kranichstein (EDK) gesammelt, bewahrt und sogar betriebsfähig erhalten, um der heutigen Generation einen lebendigen Eindruck von der "alten Eisenbahn" geben zu können.

Neben dem Sammeln und Bewahren haben die Museen auch die Aufgabe der Forschung wahrzunehmen. Im Bereich der Technik hat sich erst in jüngster Zeit die Erkenntnis durchgesetzt, daß sie ein Teil der Kulturgeschichte der Menschheit darstellt und einer entsprechenden Würdigung zu unterziehen ist. Auch die noch nicht sehr lange zurückliegende Einrichtung des Fachbereiches Industriearchäologie an der THD dokumentiert diesen Wandel in der Beurteilung der Technik.

Ursprünglich bestand eine sehr enge Verbindung zwischen der THD und dem Eisenbahnmuseum. Denn Gründer dieses Trägervereines des EDK im Jahre 1970 waren acht Studenten, von denen sechs an der THD immatrikuliert waren. Anlaß für diese Aktivitäten war das Ende des Dampflokbetriebes der Deutschen Bundesbahn in Darmstadt. Da weder die DB noch von sonstiger Seite irgend etwas zum betriebsfähigen Erhalt einiger typischer Dampfloke Exemplare getan wurde, füllte diese private Initiative die Lücke.

Der Kontakt zur THD hat sich erst wieder vor einigen Jahren durch Studenten der THD, die Mitarbeiter des Museums sind, verstärkt. Dabei konnte in Einzelfällen ein Praktikum im Fachbereich Maschinenbau im Eisenbahnausbesserungswerk des Museums absolviert werden.

Die Arbeit im EDK wird ausschließlich ehrenamtlich ausgeführt. Dies betrifft auch den Direktor des Museums, der als Jurist seinen Zugang zur Eisenbahntechnik durch seine Arbeit bei der Deutschen Bundesbahn als Lokomotivheizer erhielt, womit er sein Studium seinerzeit finanzierte.

## Vortragsthema

Der Wandel in der Eisenbahntechnik soll nun am Beispiel des Schienenschnellverkehrs von vorgestern und heute untersucht werden. Dabei ist mit vorgestern das Jahr 1932 gemeint, als die Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (DRG) den ersten Triebwagen für Schnellverkehr mit Verbrennungsmotor in Betrieb nahm.

Bis 1928 lag die Höchstgeschwindigkeit für D-Züge bei 110 km/h und wurde dann auf 120 km/h angehoben. Bereits damals begann die Eisenbahn im schnellen Geschäftsreiseverkehr die

Konkurrenz der beginnenden Zivilluftfahrt und auch des Kraftwagens zu spüren. Die Planung sah daher vor, durch Schnelltriebwagen mit einer Fahrplangrundgeschwindigkeit von 150 km/h, die zum Einholen von Verspätungen auf 160 km/h gesteigert werden konnte, eine deutliche Anhebung der Reisezeiten zwischen den Zentren des damaligen Deutschland zu erreichen.

Am 19. Dezember 1932 begannen die Probefahrten des ersten Schnelltriebwagens auf der "Rennstrecke" Berlin-Hamburg. Am 30. Dezember 1932 wurde eine offizielle Pressefahrt von Berlin aus durchgeführt, bei der der Triebwagen hinter Nauen mühelos 150 km/h überschritt und dann schließlich 165 km/h Spitzengeschwindigkeit erzielte. Am nächsten Tag, dem Silvestertag 1932, berichten dann die Morgenblätter des Reiches von dieser offiziellen Pressefahrt, wobei dem englischen Expresszug von Swindon nach Paddington das blaue Band der Schiene entrissen worden sei. Angelehnt an den Namen dieses englischen Zuges Flying Scotsmen verbreitete sich rasch der Name für den deutschen Triebwagen "fliegender Hamburger".

Mit Beginn des Sommerfahrplanes am 15. Mai 1933 wurde die erste Schnelltriebwagenverbindung für den öffentlichen Verkehr zwischen Berlin Lehrter Bf und Hamburg Hbf eröffnet. Dabei verließ der Fdt 2 Berlin um 8.02 Uhr und traf um 10.20 Uhr nach 2 Stunden und 18 Minuten nonstop Fahrt über 287 km in Hamburg ein. Die Höchstgeschwindigkeit betrug 160 km/h, die Reisegeschwindigkeit 124,6 km/h.

Dieser Triebwageneinsatz wurde auch zu einem wirtschaftlichen Erfolg, da in kurzer Zeit die wenigen Plätze dieses Triebwagens über Wochen im voraus ausverkauft waren, obwohl 98 Plätze nur der 2. Klasse angeboten wurden.

Dieser Erfolg ermutigte zu weiteren Schnelltriebwagenverbindungen, so daß mit insgesamt 34 Dieselschnelltriebwagen im Sommerfahrplan 1939 von Berlin aus die Städte München, Stuttgart, Frankfurt/M, Köln, Hamburg, Beuthen bedient wurden.

Dabei ist es nun interessant zu vergleichen, in welcher Weise sich die Entwicklung schneller Eisenbahnverbindungen bis zum Jahre 1993 entwickelt hat. Hierbei ist natürlich zu bedenken, daß ab dem 01. September 1939, dem Beginn des 2. Weltkrieges, die Höchstgeschwindigkeit wegen Energieersparnis für die Eisenbahnen in Deutschland auf 100 km/h herabgesetzt wurde und alle Schnelltriebwagen außer Betrieb genommen wurden, um Treibstoff zu sparen. Durch die Kriegereignisse war das Schienennetz der deutschen Eisenbahnen stark verwüstet worden, so daß nach 1945 nur allmählich wieder die geordneten Verhältnisse der Vorkriegszeit erreicht wurden.

Nicht erreicht wurden jedoch bis heute die Reisezeiten des Jahres 1939, auch nicht mit den heutigen Intercity- und ICE-Zügen, selbst unter Einbeziehung der neugebauten Hochgeschwindigkeitsstrecken der ehemaligen Deutschen Bundesbahn.

Eine Gegenüberstellung der Fahrzeiten aus der Tabelle zeigt, welche enormen Leistungen seinerzeit von der Deutschen Reichsbahn erbracht worden sind.

Das Herantasten an hohe Geschwindigkeiten bei der Deutschen Bundesbahn begann im Jahre 1962 mit dem Rheingold-Zug, der für eine fahrplanmäßige Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h betrieben wurde. Somit war nach 1939, 23 Jahre später, die damalige Spitzengeschwin-

digkeit wieder erreicht worden. Einen Schritt ins Neuland der Hochgeschwindigkeitszüge erfolgte 1965 anlässlich der internationalen Verkehrsausstellung in München mit täglichen Schnellfahrten mit 200 km/h Höchstgeschwindigkeit zwischen München und Augsburg.

Die hier gewonnenen Erfahrungen mündeten mit Beginn des Winterfahrplanes 1971/72 am 26. September 1971 mit der Einführung des Intercity Systems 1. Klasse im Zweistundentakt und den hierfür entwickelten neuen elektrischen Schnellfahrlokomotivender Baureihe 103. Da diese Züge noch auf dem alten Streckennetz verkehrten, konnte die Höchstgeschwindigkeit nur mit 160 km/h belassen werden. Erst im Rahmen des Ausbauprogrammes der bestehenden Strecken konnten teilweise längere Abschnitte mit 200 km/h befahren werden. Zu Beginn des Sommerfahrplanes am 27. Mai 1979 wurde der Intercity-Verkehr auch auf die 2. Klasse ausgedehnt und der Stundentakt eingeführt.

Eine weitere Steigerung erfolgte im Jahre 1985 durch Ausdehnung der für 200 km/h zugelassenen Streckenabschnitte auf insgesamt 440 Streckenkilometer (siehe Graphik).

Ein entscheidender deutlicher Fortschritt wurde erst mit Aufnahme des ICE-Betriebes am 2. Juli 1991 erzielt, unter Ausnutzung der zwischenzeitlich fertiggestellten Neubaustrecken, die für Höchstgeschwindigkeiten von bisher 280 km/h zugelassen sind. Erst auf diesen "Autobahnen der Eisenbahn" war es möglich, eine nennenswerte Anhebung der Reisezeiten zu dem Stand von 1939 zu ermöglichen.

Zurecht drängt sich jetzt die Frage auf, wieso es über 50 Jahre dauerte, bis ein weiterer Fortschritt im Schnellverkehr möglich wurde. In erster Linie hängt dies sicher damit zusammen, daß die Deutsche Reichsbahn seinerzeit die damals verfügbare Technik optimal ausgereizt hat. Die in Leichtbauweise konstruierten Triebwagen wurden sämtlich bereits damals mit Magnetschienenbremsen ausgerüstet, um eine Abbremsung des Zuges bis zum Stillstand aus 160 km/h Höchstgeschwindigkeit innerhalb von 1200 m zu ermöglichen. Die Vorsignalabstände wurden seinerzeit auf diesen Wert entsprechend vergrößert. Dies waren aber auch die einzigen baulichen Maßnahmen, die an den Strecken erforderlich waren, da man damals auch sehr wohl erkannt hatte, daß eine weitere Anhebung der Höchstgeschwindigkeit nur durch Inkaufnahme von erheblichen Ausbaumaßnahmen in die Schieneninfrastruktur zu erreichen war. Es sei auch noch darauf verwiesen, daß bereits damals bei der Deutschen Reichsbahn sämtliche Schnellzugwagen mit induktiver Zugsicherung und Sicherheitsfahrschaltung ausgerüstet waren.

Die Deutsche Bundesbahn hatte nach dem Krieg damit zu kämpfen, daß vor dem Krieg die Hauptverkehrslinien in Ost-West Richtung durch Deutschland verliefen. Als sich nach dem Krieg die Hauptverkehrsströme in Nord-Süd Richtung verlagerten, war hierfür die Schieneninfrastruktur nicht ausreichend vorhanden. Es war daher nicht möglich, auch nach Instandsetzung der kriegszerstörten Eisenbahnanlagen entsprechend hohe Reisegeschwindigkeiten zu erzielen. Gerade die Strecken über die deutschen Mittelgebirge wurden auch damals schon vom Netz der Schnelltriebwagenverbindungen im wesentlichen ausgespart. Diese Lücke wird erst jetzt mit den Neubaustrecken geschlossen.

Die Deutsche Reichsbahn erkannte auch damals schon die Vorteile im Schnellverkehr, die durch den Einsatz von Triebwagen gegenüber lokbespannten Zügen bestehen. Diese Erkennt-

nis hat sich erst heute mit den ICE-Triebwagenzügen wieder als zeitgemäße technische Lösung durchgesetzt.

Eine weitere Steigerung dieses technischen Standes wird wohl erst durch den derzeit ins Tagesgeschehen gedrunenen Neubau einer Magnetschwebbahn zwischen Hamburg und Berlin mit sich bringen, wobei eine Fahrzeit von unter einer Stunde zwischen diesen beiden Städten möglich sein wird. Ob aber dem Rad-Schiene-System, daß bis zu Geschwindigkeiten von über 500 km/h seine Eignung unter Beweis gestellt hat, oder einer Magnetschwebbahn der Vorzug zu geben ist, ist wohl eine politische Entscheidung und nicht in erster Linie eine technische Frage eines besseren Verkehrssystems.

**Prof. Raab**  
**gewidmete Aufsätze der Mitarbeiter des**  
**Fachgebiets Maschinenelemente und**  
**Mechanik**



# **Mechanik und Maschinenelemente in der Gewerbe- lehrerausbildung**

## **Ein didaktisches Konzept**

**von Alfred Neudörfer**

Gesellschaft und Wirtschaft durchleben einen tiefgreifenden Wandel. In der letzten Zeit haben sich nicht nur Arbeitsmethoden geändert, sondern auch die Einstellung zu den Mitarbeitern. Die vom Markt und der gesellschaftlichen Entwicklung hervorgerufene Abkehr von der Massen bzw. Serienproduktion zu individuelleren Produkten hat wohl den markantesten Umbruch in der Produktion seit der Einführung des Fließbandes bewirkt. Auf der anderen Seite müssen sich die Unternehmen der permanenten Forderung stellen, Kosten zu senken und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Der aufgeklärte und mündige Facharbeiter ist zur Zeit das Ideal. Mit mehr Entscheidungsfreiheit ausgestattet soll er im Rahmen seiner Kompetenzen im Team eigenverantwortlich Entscheidungen im Sinne des wirtschaftlichen Erfolges des Betriebes treffen und sie auch umsetzen. Dazu reicht die Fachkompetenz alleine nicht mehr aus. Der Mitarbeiter muß auch bereit sein, mit seinen Kollegen zu einem Team zusammenzuwachsen. Das setzt z.B. voraus, daß er seine vorhandene oder erworbene Konflikt- und Kommunikationsfähigkeit gezielt umsetzt. Schon diese kurze Aufzählung zeigt, wie einschneidend sich Berufsbilder geändert haben. Dieser Entwicklung müssen sich nicht nur die Gewerbelehrer sondern auch deren Ausbilder stellen. Didaktische Konzepte zum Struktur- und Wertewandel sind gefragt.

## **Zukünftige Anforderungen an die Lehrer im gewerblich-technischen Bereich**

Vorab: Der Gewerbelehrer braucht nach wie vor eine hohe Fachkompetenz zum Vermitteln technischer Sachverhalte. Die Fachkompetenz muß ihn befähigen, alle fachtheoretischen Inhalte, die für den jeweiligen Ausbildungsgang relevant sind, selbständig zu erarbeiten, zu verinnerlichen und so sicher zu beherrschen, daß er mindestens eine Wissensstufe über den Schülern steht.

Aber er muß zukünftig nicht nur über ein fundiertes Fachwissen verfügen sondern auch pädagogisches Geschick z.B. für die Moderatorenrolle mitbringen. Seine Schüler werden das "mitdenkende" Erarbeiten von Ergebnissen in Gruppen aus ihren Ausbildungsbetrieben in die Schule hineinragen. Er muß vor allem methodisch so kompetent sein, daß er andere, aktivierende Lernformen anwenden kann und den so häufig erlebten dozierenden, tafelbezogenen Frontalunterricht zu verlassen. Er muß in der Lage sein, zeitgemäße Medien gezielt einzusetzen und fähig sein, im Unterricht aktivierende Aufgaben vollständig, zielgerichtet und den jeweiligen Zielgruppen angepaßt zu formulieren, Gruppenarbeiten zu moderieren und die erar-

beiteten Ergebnisse zu bewerten. Er muß Schüler zum selbständigen, eigenverantwortlichen Lernen und Handeln befähigen, und sie zu sozialem und kooperativen Verhalten hinführen. Er selbst muß zum lebenslangen Lernen bereit sein und diese Bereitschaft auch bei seinen Schülern wecken.

## Stellenwert der Fächer Mechanik und Maschinenelemente

Die Fächer Mechanik und Maschinenelemente sind ein unabdingbarer zentraler Baustein des Studiums des Lehramts an Beruflichen Schulen gewerblich-technischer Fachrichtung, auf dem das ganze fachwissenschaftliche Studium aufbaut.

Das Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik wurde 1966 gegründet. Das ursprüngliche Aufgabengebiet war die "maschinenbauliche" Ausbildung zukünftiger Gewerbelehrer. Heute vermittelt das Fachgebiet in fünf Semestern mit den Fächern Maschinenelemente I bis IV einschließlich Projektionszeichnen und Technisches Zeichnen einen nicht unwesentlichen Teil der für den Studiengang relevanten Ingenieurwissenschaften. Solide Kenntnisse in diesen Fächern sind die Grundvoraussetzung zum Erlangen der Fachkompetenz in anderen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen. Eine fundierte Ausbildung in den Fächern Mechanik und Maschinenelemente I und II mit dem Schwerpunkt Technische Mechanik (Statik, Festigkeitslehre, Dynamik), ermöglicht im Zusammenwirken mit anderen fachwissenschaftlichen Disziplinen die geistige Durchdringung fast aller technischer Fragestellungen im Bereich des Metallgewerbes. Die Erfahrungen aus der zweiten Phase der Lehrerbildung zeigen, daß ein zielgerichtetes Arbeiten an der "Methodik" und "Didaktik" im Fachunterricht nur dann erfolgversprechend ist, wenn die Referendare die fachwissenschaftlichen Grundlagen sicher beherrschen.

Die Ausbildungsmaßnahmen in diesen Fächern haben zwar primär nicht die Aufgabe, dem späteren Gewerbelehrer die notwendige methodische Ausbildung angeeignet zu lassen, sie bieten dazu aber zahlreiche Chancen. Die Zielsetzung muß etwas andere inhaltliche Schwerpunkte als bei der Ingenieurausbildung setzen. Es ist unwahrscheinlich, daß ein Gewerbelehrer in seinem Beruf in eigener Verantwortung ingenieurmäßige Aufgaben z.B. eines Berechnungsingenieurs übernehmen wird. Er wird aber immer wieder vor der Aufgabe stehen, technische Sachverhalte, Zusammenhänge, Abläufe oder Problemlösungen didaktisch aufbereiten zu müssen. Das setzt voraus, daß er

Probleme von der fachwissenschaftlichen Seite begreift

sie aufgrund seiner Fachkompetenz her lösen kann

und

sie so aufbereiten kann, daß im Unterricht die Schüler Problemlösungen finden können.

Vor allem der dritte Punkt setzt voraus, daß die Gewerbelehrerstudenten zwar Grundlagenwissen brauchen aber auch möglichst frühzeitig viele praktische Erfahrungen mit verschiedenen Lösungs- und Unterrichtsmethoden sammeln sollten, die sie gezielt auf spätere Lehr- und Lernsituationen übertragen können. Diese Ausrichtung ist keinesfalls mit einem Qualitätsverfluß gleichzusetzen.



## **Zielgruppen.**

Es gibt eine Trennlinie innerhalb des beruflichen Bildungssystems. Sie grenzt Schulen mit Grundanforderungen (z.B. Berufsgrundbildungsjahr im Dualen System) von Schulen mit höheren Anforderungen (z.B. Fachoberschule, Berufliches Gymnasium) ab. Der Schwerpunkt der Unterrichtsgestaltung wird im Bereich der Grundanforderungen eher in der Fragestellung der anwendbaren Methoden und Medien liegen. Für den Unterricht in Schulen mit höheren Anforderungen sind eher Fragen der Inhalte und des anzustrebenden Wissensniveaus ausschlaggebend. Die soziale Kompetenz ist in beiden Bereichen gleich wichtig.

Gewerbelehrer müssen auch zukünftig mit großen Unterschieden in der Vorbildung, im Leistungsniveau und in der Leistungsbereitschaft sowie mit sehr unterschiedlichen inhaltlichen Anforderungen in den einzelnen Schulformen rechnen. Und jeder Absolvent kann sich nach der zweiten Staatsprüfung in jeder Schulform wiederfinden. Der ausgebildete Gewerbelehrer muß deshalb sowohl fachlich als auch methodisch in der Lage sein, jedem dieser Anforderungsprofile gerecht zu werden.

Diese Sachverhalte und Randbedingungen legen den Rahmen fest, in dem sich die primäre Ausbildung der Gewerbelehrer bewegen sollte. Nachfolgend wird berichtet, wie mit einem Verbund aus Vorlesung, Übung und Seminar im Fach Mechanik und Maschinenelemente I und II versucht wird, den neuen Anforderungen gerecht zu werden.

Allen Ausbildungsmaßnahmen liegen zwei Ideen zu Grunde:

- a) Da das tiefgehende Spezialistenwissen sehr schnell altert, ist es sinnvoller Grundkenntnisse, auf die man aufbauen kann, besonders intensiv zu behandeln und zu lernen, wie man sich schnell und effektiv in neue Wissensgebiete einarbeiten kann.
- b) Mit der Fachkompetenz läßt sich zugleich ein Teil der notwendigen Methoden- und Sozialkompetenz vermitteln.

Erfahrungen aus der Erwachsenenbildung belegen, daß sich die letztgenannten Kompetenzen auf Dauer nur durch "learning by doing" wirkungsvoll erwerben lassen.

## **Vorlesung**

Die Vorlesung (zwei, bzw. drei Semesterwochenstunden) verfolgt folgende Ziele:

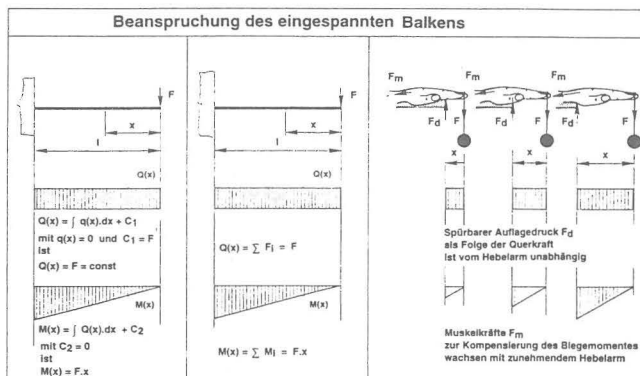
- a) Stoffvermittlung des Gebietes Mechanik unter Berücksichtigung der praktischen Erfahrung der Studenten
- b) Anregung zum Selbststudium geben
- c) Vorstellung und den praktischen Einsatz zeitgemäßer Medientechnik zu demonstrieren, die Studenten sollen damit angeregt werden, eigene Veranschaulichungsstrategien zu entwickeln

Die relativ kleine Zahl der Studenten (etwa 25 am Anfang des Kurses) bietet ganz andere Voraussetzungen zum Umsetzen didaktischer Konzepte, als es im Rahmen einer Massenvorlesung möglich ist. Die Zielgruppe der Studenten ist sehr heterogen: vom Abiturienten, der noch sein Praktikum abschließen muß bis zum Mitdreißiger, der die Qualifikation eines Industrie- oder Handwerksmeister aufweist. Die Mehrzahl der Gewerbelehrerstudenten hat eine abgeschlossene Berufsausbildung und ist über den zweiten Bildungsweg zur Hochschulreife gelangt. Das ist wohl der wesentliche Unterschied zu den meisten Studierenden der Ingenieurfächer, wie z.B. des Maschinenbaus oder der Elektrotechnik. Dieser Sachverhalt muß sich auf die Art der Wissensvermittlung auswirken, die Gesetzmäßigkeiten der Erwachsenenbildung müssen sich stärker niederschlagen als beim üblichen Hochschullehrbetrieb.

Einer der wichtigsten didaktischen Grundsätze der Erwachsenenbildung ist das betont induktive Vorgehen (vom Konkreten zum Allgemeinen, vom Bekannten zum Unbekannten und vom Einfachen zum Komplizierten) unter Berücksichtigung der Erfahrung der Teilnehmer. Erwachsenen lernen um so besser, je deutlicher der Zusammenhang zwischen Lehrstoff und eigener Erfahrung erkennbar ist.

Weiter wird angestrebt, jeden inhaltlicher Block mit mindestens zwei unterschiedlichen Methoden und Medien zu vermitteln, um unterschiedlichen Lerntypen innerhalb der Zielgruppe entgegen zu kommen. Dies soll exemplarisch an einem klassischen mechanischen Problem verdeutlicht werden - am eingespannten Biegebalken.

Um den Verlauf der Querkräfte und der Biegemomente zu bestimmen, sind zwei Methoden üblich: die Integration der Streckenlast unter Berücksichtigung der Randbedingungen und das Prinzip der Summation aller äußeren Kräfte an einem Schnittufer des Balkens zur gedachten Schnittstelle. Ergebnis sind dann Querkraft- und Biegemomentenlinien, die graphisch den Verlauf beider Größen wiedergeben. Auch wenn die graphischen Darstellungen eindeutig und anschaulich sind, ist noch lange nicht gewährleistet, daß der Verlauf beider Größen und seine Bedeutung von allen begriffen wird. Bis jetzt wurde nur der visuelle Kanal und somit das Abstraktionsvermögen angesprochen. Das sollte bei den Studenten zum Begreifen ausreichen und tut es auch. In späteren Unterrichtssituationen kann bei manchen Schülern das Vorstellungsvermögen überlastet sein. Mit Hilfe der menschlichen Hand als symbolischer Kragbalken, auf den eine äußere Kraft einwirkt, kann man den Querkraft- und Biegemomenteverlauf zumindest qualitativ verifizieren, s. Bild.



- a) Die Armmuskulatur muß das Biegemoment kompensieren, das die äußere Belastung hervorruft.- Die fühlbare Anspannung wächst annähernd linear mit der Hebelarmlänge der Last.
- b) Das Druckgefühl an der Auflagestelle der Hand ist von der Hebelarmlänge der Last unabhängig, es gibt den Verlauf der Querkraft wieder
- c) mit der sich einstellenden Relativbewegung zwischen den Fingern läßt sich sogar die Wirkung der Schubkräfte demonstrieren.

Die Studenten haben ein einfaches aber überzeugendes Medium zum Erklären relativ abstrakter Sachverhalte kennengelernt, das für Zielgruppen geeignet ist, die hauptsächlich "mit Händen begreifen".

Die Vorlesung ist frontal orientiert. Sie wird durch gezielten Einsatz öffnender und aktivierender Methoden und Medien aufgelockert. So werden mit der Metaplantechnik die Erwartungen der Studenten an den Kurs am Semesteranfang abgefragt, und Kritik und Verbesserungsvorschläge am Ende des Kurses eruiert. Diese Abfragen liefern wertvolle Anregungen zur Verbesserung des Konzeptes und der Veranstaltungen. Sie räumen den Studenten Mitgestaltungsmöglichkeiten ein. Die Ergebnisse lassen sich gezielt im später folgenden Seminar einsetzen.

## Übung

Die vorlesungsbegleitende Übung (zwei Semesterwochenstunden) verfolgt folgende Ziele:

- a) Strukturen mechanischer Fragestellungen zu analysieren; Vorgehensstrategien beim Lösen der Fragestellungen zu erlernen und einzuüben
- b) durch selbständiges Bearbeiten komplexer Aufgaben das Lösen technischer Probleme zu üben
- c) Das Arbeiten in Gruppen praktisch zu üben; lernen, sich selbst in Gruppen zu organisieren und Gruppen zu moderieren
- d) praktisches Vorrechnen als eine Art der Wissensvermittlung praktisch einzuüben

In den ersten sechs Wochen des Übungsbetriebs im ersten Semester läuft die Übung als Vorrechnungsübung mit der Zielsetzung, unter Anleitung Strategien zur Lösung von Mechanikaufgaben zu lernen. Danach wird der Kurs in Gruppen zu vier bis fünf Studenten unterteilt. Die soziale Lernform der Gruppenarbeit wurde gewählt, weil die sich entwickelnden eigenen praktischen Lernaktivitäten zu besseren und nachhaltigen Lerneffekten führen als das passive Konsumieren einer vorgerechneten Aufgabe.

Jede Gruppe wählt aus ihren Reihen einen Sprecher, der die Gruppe nach außen hin vertritt. Die Gruppen bearbeiten im Voraus alle Aufgaben, die eine Woche vor dem Übungstermin veröffentlicht werden. Am Anfang der Übungsstunde wird bestimmt, welche Gruppen für welche Aufgaben "hauptamtlich" zuständig sind. Ein ausgewähltes Gruppenmitglied rechnet dann die Aufgabe vor und erklärt sie. Aufkommende Fragen anderer Übungsteilnehmer beantwortet der Vorrechner, der Gruppensprecher oder die Gruppe selbst. Die Verantwortung für den Lösungsweg, die Richtigkeit der vorgerechneten Aufgabe und die zum Aushängen bestimmte Musterlösung liegt bei jeder Gruppe selbst. Die anwesenden Hilfsassistenten (Studenten höherer Semester mit besonderen Leistungen in Mechanik) haben die Aufgabe, die Veranstaltung zu moderieren bzw. Unklarheiten oder Fehler zu beheben, aber nicht mehr die Aufgaben vorzurechnen.

Im Übungsraum steht eine kleine Handbibliothek zur Verfügung, für deren Erhalt und Vollständigkeit die Übungsteilnehmer selbst verantwortlich sind. Als Leistungskontrolle während des Semesters sind vier Tests vorgesehen, von denen mindestens drei bestanden sein müssen.

## **Seminar Didaktische Aspekte der Mechanik**

Dieser freiwilligen Veranstaltung (zwei Semesterwochenstunden) liegt das Anliegen zu Grunde, im Meistern konkrete Lernsituationen zu lernen, welche didaktische Fragestellungen gelöst werden müssen, wenn technische Sachverhalte effektiv vermittelt werden sollen. Sie verfolgt folgende Ziele:

- a) Kennenlernen der grundlegenden Zusammenhänge und Abläufe bei der Wissensvermittlung und bei der zwischenmenschlichen Kommunikation
- b) Vertiefen des zielgerichteten Arbeitens in Gruppen
- b) Anwendung der erarbeiteten Erkenntnisse in konkreten Unterrichtssituationen
- c) Entwickeln von Kriterien zur Beurteilung von Unterrichtssituationen
- d) Einüben von konstruktiver Kritik und Erlangen von Kritikfestigkeit.

Diese Veranstaltung ist eine reine Serviceleistung des Fachgebietes für angehende Gewerbelehrer. Nach der Wissensvermittlungsphase, in der auf die grundlegenden Sachverhalte der zwischenmenschlichen Kommunikation, der Lern- und Lehrtechnik eingegangen wird, und die Grundlagen unterschiedlicher Sozialformen des Lernens sowie Grundsätze der Medientechnik vorgestellt werden, bekommen die Arbeitsgruppen die Aufgabe gestellt, im Sinne eines Projektes ein Konzept für eine Lehreinheit für die Gebiete der Mechanik zu erarbeiten, die nach Meinung der Studenten in den vorangegangenen Vorlesung nicht besonders überzeugend dargeboten wurden. Dazu gehört das Festlegen von Lernzielen und Kontrollmöglichkeiten, Festlegen von Inhalten samt der zugehörigen Stoffsammlung, Erstellen von Medien, eines Leitfadens und einer Kurzfassung. Die Lehreinheit wird unter realen Bedingungen gehalten, wobei die Zuhörer die Aufgabe haben, die Präsentation

möglichst objektiv anhand nachvollziehbarer Kriterien - die sie selbst aufstellen müssen - zu beurteilen. Die jeweils Aktiven müssen sich der Kritik der Kommilitonen stellen.

### **Zusammenfassung**

Mechanik gilt als ein Fach, in dem hauptsächlich "trockene" Sachverhalte auf einem erheblichen Abstraktionsniveau vermittelt werden. Sie ist ein absolutes Muß, um eine überzeugende Fachkompetenz zu erlangen. Im Verbund mit den bewährten Grundsätzen der Erwachsenenbildung bietet sie aber auch Chancen, sowohl methodische und soziale Kompetenzen zu vermitteln. Beide sind neben der Fachkompetenz wichtige Voraussetzungen für angehende Gewerbelehrer, um die zukünftigen Herausforderungen in der Berufsausbildung zu meistern.



# Ein Vorschlag zur Nomenklatur moderner Kettentriebe

von Edgar Dörsam

## 1 Einleitung

Mit der Erfindung der Gallkette, die nach ihrem Erfinder Andre Galle benannt und 1829 patentiert wurde, nahm die Bedeutung der Kette als Maschinenelement rasant zu. Durch die Erfindung der Rollenkette von Hans Renold im Jahr 1880 wurden dann endgültig die Voraussetzungen für die Entwicklung leistungsfähiger Kettentriebe geschaffen (MÜLLER 1913). Seit dieser Zeit wurden weitere Kettenbauformen entwickelt, die inzwischen einen vielseitigen Einsatz von Ketten und Kettentrieben ermöglichen. Bei neueren Anwendungen werden die Ketten zunehmend als integraler Bestandteil von Maschinen und Anlagen eingesetzt. Für eine Untersuchung und Analyse derartiger Kettenanwendungen müssen daher alle diejenigen Bauteile berücksichtigt werden, die den Kettentrieb unmittelbar oder mittelbar betreffen; es ist eine Betrachtung des Gesamtsystems notwendig. Außerdem sind durch die heute verfügbare hohe Qualität der Ketten neue Einsatzfelder erschlossen worden, die sich nicht mehr eindeutig in die traditionelle Einteilung antriebs- und fördertechnischer Anwendungen einordnen lassen. Da diese Kettenanwendungen oft nur noch wenig Gemeinsamkeiten mit einem einfachen Zweirad-Kettentrieb aufweisen, lassen sich diese auch nicht mehr vollständig mit den bisher gebräuchlichen Begriffen beschreiben.

Nach einer kurzen Problematisierung der bisherigen Begriffsbildung werden daher im folgenden Vorschläge vorgestellt, welche die Systemeigenschaften der Kettentriebe berücksichtigen. Insbesondere wird dabei auf die im Zusammenhang mit Kettenführungen notwendige Begriffswelt eingegangen.

## 2 Kettenanwendungen der Antriebs- und Fördertechnik

Kettentriebe werden heute wegen ihrer Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit in der Antriebs- und Fördertechnik auf vielfältige Weise zur Leistungsübertragung und kinematischen Kopplung eingesetzt.

Während es Ziel der **Antriebstechnik** ist, Bewegung oder Leistung zu übertragen, befaßt sich die **Fördertechnik** mit Maschinen und Anlagen zum Transport von Lasten, Gütern und Personen (über kurze Strecken), die weiterhin in Fördermittel und Hebezeuge unterteilt werden können. Fördermittel dienen dabei zum kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Transport von flüssigem oder festen Material oder Personen. Hebezeuge bewegen Einzelgüter

(Lasten) in senkrechter oder senk- und waagrechtlicher Richtung auf kurze Entfernung im aussetzenden Betrieb (MEYERS 1970, S. 1018 u. 1262).

Die Ketten werden üblicherweise nach den drei Hauptanwendungsbereichen unterschieden (MONSBERGER 1973, DRESSLER 1974, BASEDOW 1975):

- Antriebsketten (Kettengeschwindigkeiten bis 40 m/s)
- Förderketten (Kettengeschwindigkeiten bis 3 m/s)
- Lastketten (Kettengeschwindigkeiten bis 1 m/s)

In der Antriebstechnik ermöglichen Ketten als formschlüssige Elemente eine schlupffreie Übertragung hoher Momente bei kleinen und großen Umfangsgeschwindigkeiten. Hinsichtlich ihres spezifischen Bauraums, der Beschaffungs- und Unterhaltungskosten, der übertragbaren Leistung und der Anforderungen an Wartung und Pflege sind sie zwischen Riemen- und Zahnradgetrieben einzuordnen. Die größte Marktbedeutung unter den Stahlgelenkketten hat die Rollenkette erlangt (BASEDOW 1975, COENEN 1986).

Viele Förderketten bauen auf dem Prinzip der Rollenkette auf. Durch oftmals einfache konstruktive Änderungen an Bolzen, Buchsen und Laschen oder durch den Anbau von Rollen, Winkeln und Haken entstehen neue Bauelemente, mit denen sich viele Förderprobleme lösen lassen. Die Gestaltung und die Auslegung von Förderketten erfolgen je nach Anwendungsfall, da immer die Erfordernisse des Fördergutes mit berücksichtigt werden müssen (MONSBERGER 1973, LEIDER 1980).

Die wichtigste Lastkette ist die Rundstahlgliederkette, die sich durch eine gute Beweglichkeit, niedrigen Preis, Unempfindlichkeit und kleine Aufwickeldurchmesser auszeichnet. Sie findet als Anschlag- und Schlingkette sowie als Haspelkette für kleinere Winden und Flaschenzüge Verwendung. Wegen ihrer Nachteile gegenüber dem Stahlseil, kleine zulässige Geschwindigkeiten und hohes Eigengewicht, hat die Lastkette im Hebezeugbau nur eine untergeordnete Bedeutung. Neben der Rundstahlkette werden auch einige Stahlgelenkketten als Lastketten verwendet (GROTE 1953, NIEDERBERGER 1975, ZEBISCH 1980, S. 32 - 49).

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß im allgemeinen die Einsatzfelder von

- Antriebsketten durch große Kettengeschwindigkeiten und hohe Leistungsübertragung,
- Förderketten durch mittlere Kettengeschwindigkeiten und große bewegte Lasten und
- Lastketten durch kleine Kettengeschwindigkeiten und hohe aber kaum bewegte Lasten gekennzeichnet sind.

Eine andere Möglichkeit zur Unterteilung der Ketten besteht darin, sie entsprechend ihrem Aufbau in Gliederketten und Stahlgelenkketten einzuteilen. Im Gegensatz zur Gliederkette weist die Stahlgelenkkette ein ausgebildetes Gelenk auf, welches aus Bolzen und Lagerschale oder zwei Wiegegelenkzapfen besteht.

Bei der Untersuchung von in Druck- und Verpackungsmaschinen eingesetzten Kettentrieben hat sich gezeigt, daß sich diese Kettentriebe nicht mehr eindeutig einem der drei oben genannten Hauptanwendungsgebiete zuordnen lassen:



- Für eine Einordnung als Lastkette sind in diesem System die Geschwindigkeiten zu hoch und die Lasten zu klein. Außerdem handelt es sich nicht um das Bewegen von Einzelgütern.
- Gegen eine Betrachtung als Antriebskette spricht, daß diese Kettentriebe nicht nach den Regeln einer Antriebskette ausgelegt werden (BERENTS 1989). Ferner ist der Aufbau der Kette durch andere Laschenformen und Anbauteile verändert. Es werden zudem sehr hohe Anforderungen an die Übertragungsgenauigkeit gestellt.
- Auch als Förderketten lassen sich diese Anwendungen schlecht einordnen. Die Ketten sind gegenüber den auftretenden Kräften überdimensioniert und laufen relativ schnell. Zudem sind die Anforderungen an die Übertragungsgenauigkeit ungewöhnlich hoch.

### 3 Kettensysteme der Bewegungstechnik

#### 3.1 Definition des Anwendungsbereiches "Bewegungstechnik"

Zur Unterscheidung von der Antriebs- und Fördertechnik wird daher vorgeschlagen, den oben skizzierten Anwendungsbereich als "**Bewegungstechnik**" zu bezeichnen, der im wesentlichen durch folgende Punkte gekennzeichnet ist:

- im Verhältnis zur Bruchkraft relativ kleine Kettenkräfte
- Kettengeschwindigkeiten von 0,5 bis 10 m/s
- Übertragung von (Lage-) Informationen
- Einsatz von Kettenführungen

Die Bewegungstechnik beschreibt also die Bewegung von Produkten oder Bauteilen mit einer möglichst großen Übertragungsgenauigkeit; die Übertragung von Informationen spielt immer eine bedeutende Rolle. Die hier eingesetzten Ketten zeichnen sich im allgemeinen dadurch aus, daß Standardketten zusätzliche Anbauteile (Mitnehmer, Winkelhebel u. ä.) enthalten, die oft auch die Kettengröße bestimmen. In der Praxis unterscheiden sich daher Kettentriebe der Bewegungstechnik stark von solchen der Antriebs- und Fördertechnik: die Kettengröße ist oft überdimensioniert, die Kettengeschwindigkeit ist relativ groß und die Anforderungen an die Übertragungsgenauigkeit sind sehr hoch.

Da bei den genannten Anwendungen in der Bewegungstechnik am Kettentrieb immer auch eine Kettenführung vorhanden ist, sollten solche Kettentriebe als "**Kettensysteme**" (bestehend aus Kette, Kettenrad und Kettenführung) bezeichnet werden. Kettensysteme dieser Art sind beispielsweise in Verpackungs-, Buchbinde- und Druckmaschinen sowie in PKW-Motoren zum Antrieb von Nockenwellen zu finden. Bei einigen dieser Anwendungen sind jedoch weitere Komponenten notwendig (z. B. Greiferwagen zum Bogentransport in Druckmaschinen), die dann auch als Bestandteil der Kettensysteme betrachtet werden sollten (CAMPHAUSEN/RIEDL 1967, MAN ROLAND 1973, CHAY/HAGEDORN 1979, FERSEN 1991).

### 3.2 Definition "Kettensystem"

Die Bauformen von Stahlgelenkketten und die Benennung von Kettenteilen sind in DIN 8194 genormt. Eine Festlegung von Begriffen und Teilen von Kettenführungen ist darin jedoch nicht enthalten. Auch in der Literatur und Praxis gibt es bisher keine eindeutige begriffliche Festlegung für Führungen und Führungselemente.

Nach Vorschlägen von MÜLLER (1981a; 1981b; 1983, S. 27 - 30) sind unter Hilfs- und Zusatzeinrichtungen für Rollenkettentriebe alle diejenigen Baugruppen zu verstehen, welche nicht unmittelbar an der Leistungsübertragung beteiligt sind, jedoch den Gebrauchswert, die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten und die Funktionssicherheit erhöhen. MÜLLER unterteilt die Hilfs- und Zusatzeinrichtungen entsprechend der Einflußnahme auf das Betriebsverhalten in drei Gruppen: keine, indirekte und direkte Einflußnahme (vgl. Bild 1).

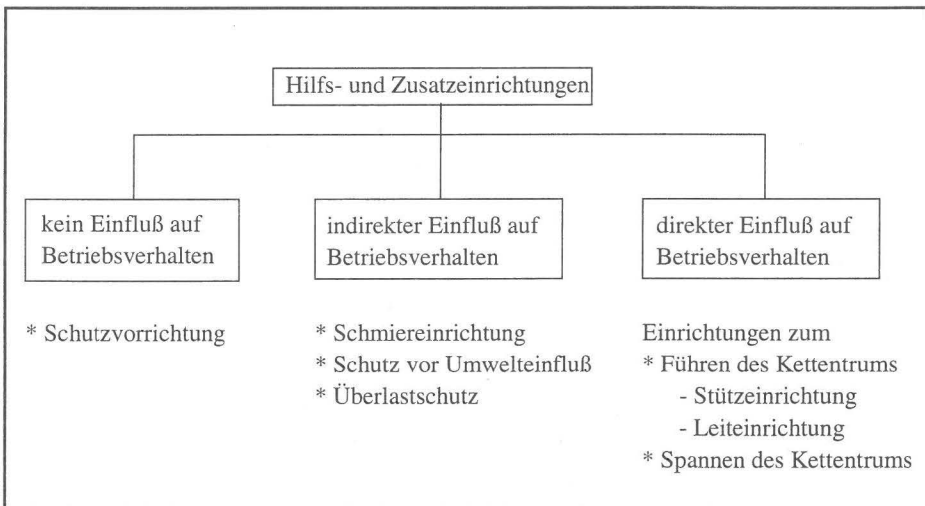


Bild 1: Einteilung der Hilfs- und Zusatzeinrichtungen für Rollenkettentriebe nach MÜLLER (1981a)

Die Wahl der Einteilungskriterien wird nicht näher begründet und die Einflußnahme auf das Betriebsverhalten wird nur allgemein beschrieben. Vor diesem Hintergrund erscheinen einige der getroffenen Einteilungen, zumindestens aus der Blickrichtung der Bewegungstechnik, als fragwürdig. Während beispielsweise der Schmiereinrichtung eine indirekte Einflußnahme zugeschrieben wird, soll ein Kettenspanner einen direkten Einfluß auf das Betriebsverhalten aufweisen. Die Aufgabe einer Schmiervorrichtung ist es, dem Kettengelenk genügend Schmierstoff zuzuführen. Der im Neuzustand der Kette vorhandene Schmierstoffvorrat im Kettengelenk wird dadurch ergänzt, der Gelenkverschleiß reduziert. Eine Aufgabe eines Kettenspanners kann es sein, nach einer verschleißbedingten Kettenlängung den Trumdurchhang zu korrigieren. Beide Einrichtungen haben offenbar die Aufgabe, eine gebrauchsbedingte Veränderung des Anfangszustandes zu kompensieren. Im Neuzustand des Kettentriebs wären daher beide Einrichtungen nicht notwendig. Beim längeren Gebrauch

unterscheiden sich die beiden Einrichtungen insofern, daß die Auswirkungen einer mangelhaften Schmierung durch einen Kettenspanner ausgeglichen werden können. Wie die Praxis jedoch zeigt, können die negativen Auswirkung einer "falschen Schmierung" auf das Betriebsverhalten gravierender sein als der positive Einfluß eines Kettenspanners (vgl. NN 1981, RAAB/DÖRSAM/KRAUS 1992). Sicherlich ist auch eine andere Sichtweise der Aufgaben von Schmiereinrichtung und Kettenspanner möglich, doch zeigt das Beispiel deutlich, daß die Einteilung nach MÜLLER nicht für alle Einsatzfälle zufriedenstellend ist.

MÜLLER (1981a) unterscheidet weiterhin Einrichtungen zum Führen und Spannen des Kettentrums. Spanneinrichtungen unterscheiden sich danach von den Führeinrichtungen durch eine permanent einwirkende Kraft, die der Kette eine zusätzliche, kontrollierbare Vorspannung gibt. Allerdings berücksichtigt MÜLLER nur Spannelemente, welche direkt auf den Kettentrum wirken und damit den Durchhang beseitigen. Solche Spannelemente, die durch eine Veränderung des Achsabstandes eine Vorspannung (von Last- und Leertrum) erreichen, werden in seiner Untersuchung nicht berücksichtigt. Die Aufgabe von Führungseinrichtungen besteht laut MÜLLER darin, die Kette um Hindernisse herumführen oder den Umschlingungswinkel zu vergrößern.

In der Praxis ausgeführte Kettentriebe zeigen, daß die zusätzlichen Elemente am Kettentrieb oft mehrere Aufgaben erfüllen. Beispielsweise kann ein Spannelement die Kettenspannkraft erhöhen und gleichzeitig die Kette in eine andere Bahn zwingen. Im allgemeinen beeinflusst jedes Spannelement die Kettenbahn und kann daher als ein Führungselement angesehen werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß sich die in der Bewegungstechnik eingesetzten zusätzlichen Führungselemente nicht zufriedenstellend in die Einteilung nach MÜLLER (vgl. Bild 1) einordnen lassen. Im folgenden müssen die für eine Untersuchung des kinematischen und dynamischen Verhaltens von Kettentrieben unter Berücksichtigung von Kettenführungen relevanten Begriffe präzisiert werden:

Der **Kettentrieb** der Bewegungstechnik besteht mindestens aus einem Kettenrad und einer, nicht zwangsläufig geschlossenen, Kette. In der Regel besteht der Kettentrieb aus zwei Kettenrädern und einer geschlossenen Kette. Verlaufen mehrere Kettentriebe mit gleichen Wellen (Achsen) parallel zueinander, so wird dies als ein **mehrsträngiger** Kettentrieb bezeichnet.

Unter **Kettenführungen**, oder kurz **Führungen**, werden alle zusätzlichen Baugruppen am Kettentrieb verstanden, die im Ruhe- oder Betriebszustand die Bahn des Kettentrums beeinflussen bzw. verändern oder auf den Kettentrum wirkende innere und äußere Kräfte aufnehmen. Führungen können entsprechend ihrer Hauptaufgabe als Einrichtungen zum Spannen, Stützen und Leiten unterteilt werden. Einzelne Bauteile der Führungen werden als **Führungselemente** bezeichnet.

Als **Kettensystem** wird ein Kettentrieb dann bezeichnet, wenn zur Erfüllung der Aufgabe die am Kettentrieb vorhandenen Führungselemente unbedingt notwendig sind.

Ziel dieser Präzisierung ist eine widerspruchsfreiere Erfassung aller an der Bewegungsübertragung beteiligten Elemente und die Einführung einer einheitlichen Nomenklatur.

### 3.3 Definitionen zur Führungsanordnung

Die in der Praxis ausgeführten Kettentriebe mit Führungen können insbesondere hinsichtlich der relativen Lage der Führung zum Kettenrad unterschieden werden. Darauf wird im folgenden eingegangen und einige wichtige Begriffe eingeführt.

In der Praxis weit verbreitet sind die sogenannten **Sehnen-** und **Tangentenanordnungen**. Die Begriffe "Sehne" und "Tangente" beziehen sich dabei auf den Teilkreisdurchmesser  $d$  und die relative Stellung der Kettenrollen. Die Sehne wird gebildet durch die **Führungsgerade** und den durch die Mittelpunkte zweier Kettenrollen begrenzten Teilkreis; sie hat genau die Länge einer Teilung (s. Bild 2a). Bei der Tangentanordnung berührt die Führungsgerade den Teilkreis (s. Bild 2b). Die Führungsgerade stellt die idealisierte Kettenbahn dar, die sich durch die Anordnung der Führung ergibt.

Eine charakteristische Größe für die Sehnen- und Tangentanordnung ist die **Führungshöhe  $h$** . Sie ist definiert als der Abstand zwischen der Führungsgerade und einer zur Führungsgeraden parallelen Gerade durch den Teilkreismittelpunkt. Wie Bild 2 zeigt, ergibt sich die Führungshöhe zu

Sehnenanordnung: 
$$h = h_s = \frac{d}{2} \cos \alpha = r \cos \alpha = r \cos \left( \frac{180^\circ}{z} \right)$$

Tangentenanordnung: 
$$h = h_T = \frac{d}{2} = r$$

mit Teilkreisdurchmesser  $d$  bzw. -radius  $r$ , halbem Teilungswinkel  $\alpha$  und Zähnezahl  $z$ .

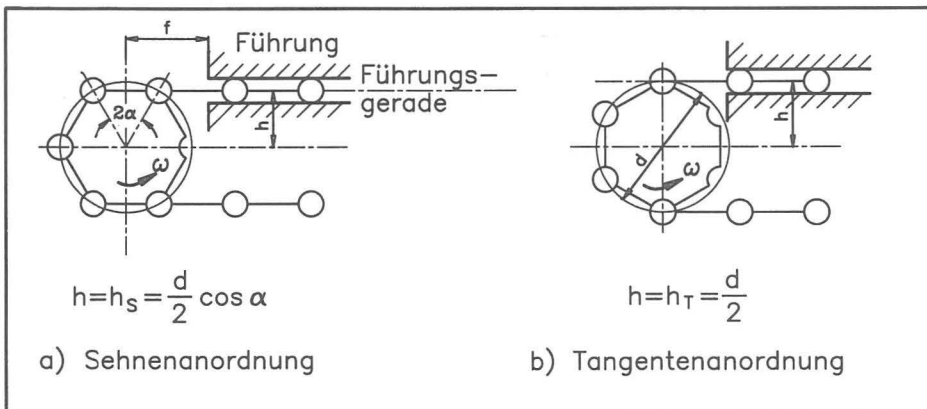


Bild 2: Sehnen- und Tangentanordnung einer Führung

Eine weitere charakteristische Größe ist der **Führungsabstand  $f$** , der in Bild 2 am Beispiel der Sehnenanordnung dargestellt wird. Der Führungsabstand ergibt sich als der Abstand von der Führung zum Lot auf die Führungsgerade durch den Teilkreismittelpunkt.

Bei einem einfachen Kettensystem ist der Führungsabstand im allgemeinen ungleich Null. Soll für die in Bild 2 dargestellte Tangentenanordnung der Führungsabstand  $f = 0$  werden, so muß die Führung bis in die Verzahnung des Kettenrades hineinreichen. Dazu sind sowohl an der Führung als auch am Kettenrad geometrische Veränderungen notwendig, die im allgemeinen zu einer Reduzierung der Zahnbreite des Kettenrades führen. Bei der Sehnenanordnung ist diese geometrische Veränderung bereits bei einem Führungsabstand  $f = p/2$  notwendig; Führungsabstände  $f < p/2$  sind in diesem Fall nicht möglich.

Für die Tangentenanordnung hat ein Führungsabstand von  $f = 0$  eine besondere Bedeutung. Hier wird die Rolle von der Führung soweit geführt, bis der Kettenradzahn die Rolle weiterfördert. D. h. die Rolle hängt zu keinem Zeitpunkt frei zwischen Führung und Kettenrad. Die Kette läuft tatsächlich tangential in das Kettenrad ein, was bei einem Führungsabstand  $f \neq 0$  nicht der Fall ist. Dieser Sonderfall soll daher als **Tangenteneinlauf** bezeichnet werden.

Weder in der Praxis noch in der Literatur gibt es allerdings bisher für die Anordnungs- und Einlaufsart eine klare Begriffsbildung. Begriffe wie "Einlauf in Tangentenrichtung", "Tangenteneinlauf" und "Tangentenanordnung" werden ohne weitere Differenzierung nebeneinander verwendet. Für die Tangentenanordnung mit dem Führungsabstand  $f = 0$  verwendet beispielsweise SCHEFFLER/KURTH (1987) den Begriff "echter Tangenteneinlauf". Es ist daher notwendig, daß die Unterschiede zwischen Anordnung und Einlauf noch einmal klar definiert werden:

Die **Anordnungsart** wird nur durch die Führungshöhe  $h$  bestimmt. Zwischen der Sehn- und Tangentenanordnung sind weitere Anordnungen möglich, die jedoch keine eigenen Bezeichnung haben. Es sind ferner Anordnungsarten denkbar, deren Führungshöhe kleiner als bei der Sehnenanordnung ( $h < h_s$ ) oder größer als bei der Tangentenanordnung ( $h > h_T$ ) sind.

Ein Sehn- oder Tangenteneinlauf liegt nur dann vor, wenn die Kette kontinuierlich von der Führung bis zur Übernahme durch die Verzahnung geführt wird. Dazu ist auch ein bestimmter Führungsabstand  $f$  erforderlich, d. h. folgende Bedingungen müssen erfüllt sein:

Sehneneinlauf:	$h = h_s = r \cos \alpha$	$f = f_s = \frac{p}{2}$
Tangenteneinlauf:	$h = h_T = r$	$f = f_T = 0$

Der Sehn- und Tangenteneinlauf bildet damit nur einen Sonderfall der Sehn- bzw. Tangentenanordnung.

## 4 Zusammenfassung

Viele Kettenanwendungen können weder der Antriebs- noch der Fördertechnik eindeutig zugeordnet werden. Dies ist dann der Fall, wenn mit dem Kettentrieb Teile mit hoher Übertra-

gungsgenauigkeit bewegen werden sollen, also keine großen Massen zu fördern oder hohe Leistungen zu übertragen sind. Es wird daher vorgeschlagen, für diesen Anwendungsbereich den Begriff "Bewegungstechnik" einzuführen.

Moderne Kettentriebe werden heute in Maschinen und Anlagen als integraler Bestandteil so eingesetzt, daß nur noch schwer zu unterscheiden ist, welche Teile zum Kettentrieb und welche Teile zur Maschine gehören. Bei der Analyse solcher Kettenanwendungen muß daher das Gesamtsystem betrachtet werden. Der Begriff "Kettentrieb" muß deshalb umfassender als bisher verstanden werden; es wird vorgeschlagen, dafür den Begriff "Kettensystem" zu verwenden.

Abschließend wurden noch einige Vorschläge unterbreitet, wie der Begriff der "Kettenführung" verstanden werden sollte und wie die Lage der Führung am Kettenrad eindeutig beschrieben werden kann.

## 5 Literatur

- BASEDOW, G. (1975): Ketten in der Antriebstechnik  
Antriebstechnik 14 (1975) 2, S. 73 - 76
- BERENTS, R. u. a. (1989): Handbuch der Kettentechnik  
Einbeck: Arnold & Stolzenberg GmbH, 1989
- CAMPHAUSEN, A.; R. RIEDL (1967): Kettenübergabe an Bogen-Rotationsdruckmaschinen  
IPM-Mitteilungen 9 (1967) 2, S. 55 - 59
- CHAY, P. V.; H. HAGEDORN (1979): Optimierung des Greiferwagen-Kettengetriebes einer  
Mehrfarben-Offset-Druckmaschine  
Maschinenbautechnik 28 (1979) 12, S. 540 - 542
- COENEN, W. (1986): Rollenketten  
VDI-Z 128 (1986) 8, S. 265 - 273
- DRESSLER, K. (1974): Ausführungsformen und Vorteile von Ketten für Antriebsaufgaben  
Maschinenmarkt 80 (1974) 57, S. 1115 - 1116
- FERSEN, O. VON (1991): Motoren für die 90er Jahre  
Krafthand 64 (1991) 5, S. 206 - 210
- GROTE, H. (1953): Der Demag-Kleinzug mit zwei Hubgeschwindigkeiten  
Demag Nachrichten (1953) 132, S. 17 - 24
- LEIDER, M. (1980): Konstruktive Gestaltung des Rollenkettentriebs unter Berücksichtigung  
der Verwendungsart - Teil 1  
Draht 31 (1980) 1, S. 15 - 20

- MAN ROLAND (Hrsg.) (1973): Ketten in Bogenoffsetmaschinen  
Roland Nachrichten Nr. 37, S. 18 - 21, Offenbach: MAN Roland AG, 1973
- MEYERS (1970): Meyers Lexikon der Technik und der exakten Naturwissenschaften  
zweiter Band, Mannheim: Bibliographisches Institut, 1970
- MONSBERGER, S. (1973): Um den Verschleiß niedrig zu halten - Auch bei Kettenförder-  
anlagen beginnt die Wartung schon bei der Anlagenplanung  
Maschinenmarkt 79 (1973) 58, S. 1292 - 1296
- MÜLLER, B. (1913): Die moderne Gelenkkette und ihr Entwicklungsgang  
Die Fördertechnik (1913) 3, S. 50 - 53
- MÜLLER, J. (1981a): Zur Ordnung von Führ- und Spanneinrichtungen der  
Rollenkettengetriebe  
Maschinenbautechnik 30 (1981) 11, S. 500 - 501
- MÜLLER, J. (1981b): Schädigungen an Rollenkettengetrieben mit Spanneinrichtungen  
Maschinenbautechnik 30 (1981) 12, S. 550 - 552
- MÜLLER, J. (Hrsg.) (1983): Getriebetechnik Rollenkettengetriebe  
1. Aufl., Berlin: VEB Verlag Technik, 1983
- NIEDERBERGER, K. (1975): Anschlagketten hoher Güte aus Baukastenteilen selber  
zusammensetzen  
Maschinenmarkt 81 (1975) 77, S. 1447 - 1448
- NN (1981): Die Falsch-Schmierung von Rollenketten  
Der Konstrukteur 12 (1981) 11, S. 54 - 56
- RAAB, W.; E. DÖRSAM; M. KRAUS (1992): Kein Stillstand: Lebensdauer von Rollenketten  
erhöhen mit konstruktiven und tribologischen Maßnahmen  
Maschinenmarkt 98 (1992) 47, S. 58 - 63
- RACHNER, H.-G. (1962): Stahlgelenkketten und Kettentriebe  
Berlin: Springer Verlag, 1962
- SCHEFFLER, M.; F. KURTH (1987): Grundlagen der Fördertechnik, S. 73 - 81  
Berlin: VEB Verlag Technik, 1987
- ZEBISCH, H.-J. (1980): Fördertechnik 1  
3., überarb. u. erw. Aufl., Würzburg: Vogel-Verlag, 1980





# **Forschungsthema Paßfederverbindungen an der Technischen Hochschule Darmstadt**

**von Volker Günther**

Zum heutigen Zeitpunkt kann das Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik auf dem Gebiet der Paßfederverbindungen (PFV) als kompetente Forschungsstelle angesehen werden. Dies kommt in dem laufenden Forschungsvorhaben zur Ermittlung der Dauerhaltbarkeit von Paßfederverbindungen ebenso zum Ausdruck wie bei der Mitarbeit im Normausschuß zur Paßfederberechnung.

Wie es zu dieser nicht unbedeutenden Stellung des Darmstädter Fachgebietes beim Forschungsthema Paßfederverbindungen kam und welche bisherigen Forschungsarbeiten dies ermöglicht haben wird hier dargestellt.

## **Bisherige Entwicklung**

Als Ausgangspunkt der Entwicklung bis hin zu den heutigen Forschungsaktivitäten an antriebstechnischen Bauteilen im Bereich der Technischen Hochschule Darmstadt können Arbeiten aus den fünfziger Jahren gesehen werden, darunter beispielsweise auch die von RAAB /4/. Am damaligen Lehrstuhl Maschinenelemente wurden genutete Wellen und Sicherungsringverbindungen experimentell mit Hilfe der Spannungsoptik untersucht und mit den Ergebnissen aus Schwingversuchen an Originalbauteilen verglichen.

Ende der siebziger Jahre wurde am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik an die zuvor genannten Arbeiten angeknüpft. In den Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkung von Mehrfachkerben von PERSECKE /3/ und /5/ standen Wellen mit Paßfedernuten nach DIN 6885 /1/ im Mittelpunkt. Die umfassende Auswertung und Gliederung des Wissens über Paßfederverbindungen sowie die Auswertung einer Umfrage bei antriebstechnischen Unternehmen zur Anwendung, Berechnung und Gestaltung von Paßfederverbindungen stellen wesentliche Vorarbeiten für nachfolgende Arbeiten dar. Mit Hilfe von Spannungsoptik und Finite-Elemente-Methode (FEM) wurden die Beanspruchungen in Wellen mit Paßfedernuten ermittelt und den Ergebnissen aus Dauerversuchen an genuteten Wellen unter Umlaufbiegung gegenübergestellt.

Einen wesentlichen Beitrag über Paßfederverbindungen liefert ZANG /14/ und /6/ mit seinen Untersuchungen an kompletten Paßfederverbindungen. Durch geeignete Modellbildung wird mit Hilfe der räumlichen Spannungsoptik die Beteiligung von Nabe und Paßfeder bei der Drehmomentübertragung erfaßt. Hierdurch werden gegenüber den Versuchen an genuteten Wellen (beispielsweise von PERSECKE /3/) völlig andere Beanspruchungen für das kritische Bauteil Welle ermittelt. Der in den Schwingversuchen mit torsionsbelasteten Paßfederverbindungen auftretende Schwingungsverschleiß erweist sich als maßgebliche Versagensursache für die Welle. Die Auswirkung von geometrischen Variationen der Paßfederverbindung nach

DIN 6885 /1/ auf die Dauerhaltbarkeit liefern wichtige Anhaltspunkte für die Anwendung dieser Welle-Nabe-Verbindung.

Mit der Arbeit von WEIGAND /13/ werden die Grundlagen für Untersuchungen an biegebelasteten Paßfederverbindungen bereitgestellt. Mit Hilfe der räumlichen Spannungsoptik wird eine vollständige Spannungsanalyse für biegebelastete Paßfederverbindungen durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Umlaufbiegeprüfstand aus Eigenmitteln des Fachgebiets erstellt. Die damit geschaffene Prüfkapazität ermöglicht es das umfangreiche Versuchsprogramm mit statistisch abgesicherten Daten zu belegen. Die Ergebnisse aus den Dauerversuchen unter Umlaufbiegung weisen auch hier den Schwingungverschleiß als Versagenskriterium für die Welle aus. Für verschiedene geometrische Parameter nach DIN 6885 /1/ werden die Beanspruchungen und die Einflüsse auf die Lebensdauer dieser Welle-Nabe-Verbindung ermittelt.

Die versuchstechnischen Vorarbeiten von WEIGAND nutzend wendet sich RENNEISEN /11/ den für die Praxis relevanten Lastfällen mit Umlaufbiegung und überlagerter quasistatischer Torsion zu. Die Versuchsergebnisse bestätigen auch hier das auftreten von Schwingungverschleiß. Einige geometrische Parameter werden spannungsanalytisch mit Hilfe von räumlicher Spannungsoptik und FEM untersucht. Bei den Dauerversuchen wird außerdem die Auswirkung von technologischen Maßnahmen am Beispiel des Nitrocarburierens bei Paßfederverbindungen ermittelt.

Die Arbeiten von PERSEKE /3/, WEIGAND /13/ und RENNEISEN /11/ wurden durch Mittel der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.

### **Derzeitige Forschungsaktivitäten**

Das mit den genannten Forschungsarbeiten zur Verfügung stehende Wissen über Paßfederverbindungen eröffnete die Möglichkeit, gegenüber der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) ein Angebot zum beabsichtigten Forschungsvorhaben "Paßfederbeanspruchungen" abzugeben. In Verbindung mit der zuvor vom Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik für die FVA durchgeführten Literaturrecherche /12/ zu diesem Thema war die Notwendigkeit für dieses Forschungsvorhaben erkannt worden. Im Verlaufe des Jahres 1991 erhielt das hiesige Fachgebiet von der FVA den Auftrag für die Durchführung des Forschungsvorhabens Nr. 217 "Ermittlung der Dauerhaltbarkeit von Paßfederverbindungen" /8/.

Im Jahr 1992 wurde am hiesigen Fachgebiet das zur Zeit laufende Forschungsvorhaben FVA-Nr. 217 /8/ begonnen. Für das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens vorgesehene Versuchsprogramm ist zunächst ein zusätzlicher größerer Prüfstand zur Durchführung von Dauerversuchen mit Umlaufbiegung erstellt worden. Der Schwerpunkt dieses Forschungsvorhabens liegt in der Bereitstellung von statistisch abgesicherten Versuchsergebnissen für verschiedene Varianten von Paßfederverbindungen unter Umlaufbiegebelastung mit überlagerter quasistatischer Torsion. Die folgenden Parameter werden im Rahmen dieses Versuchsprogramms untersucht:

- Verhältnis von Torsions- und Biegebelastung
- Geometrische Gestaltungsvarianten

- Größeneinfluß
- Werkstoff- und Wärmebehandlung

### **Norm zur Berechnung von Paßfederverbindungen**

Ebenfalls im Jahr 1992 wurde im Normausschuß Maschinenbau (NAM) begonnen, den Entwurf zu einer Berechnungsnorm für Paßfederverbindungen zu erstellen. Bisher sind lediglich die Geometrie von Paßfeder und Paßfedernut in der DIN 6885 /1/ festgelegt. Unter federführender Mitwirkung des Fachgebietes Maschinenelemente und Mechanik entstand im Arbeitsausschuß 2.2 "Wellen" der Entwurf zur DIN 6892 /2/, der in der ersten Hälfte des Jahres 1994 veröffentlicht werden soll. Die Berechnungsnorm ist in drei unterschiedlich umfassende Methoden hinsichtlich der Genauigkeit (im Sinne der Berücksichtigung von Einflußfaktoren) gegliedert:

- Mit der Methode A wird ein umfassendes Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung der Ergebnisse laufender und zukünftiger Untersuchungen /8/ und /9/ in der Norm vorgehen. Eine allgemeingültige Vorgehensweise hierzu kann heute noch nicht angegeben werden.
- Die Berechnungsmethode B des Normentwurfs hält weiter an der Flächenpressungsauslegung fest. Die Berücksichtigung zahlreicher Einflußfaktoren (z. B. Lastverteilung, Reibschluß, Traganteil etc.) ist bei der Bestimmung der auftretenden Flächenpressungen möglich. Die bereits heute abgesichert vorliegenden Erkenntnisse sind hier vor allem in Form von Gestaltungsregeln eingeflossen.
- Bei der Methode C handelt es sich um eine überschlägige Berechnung der Flächenpressungen und daraus resultierender Abschätzung der Wellenbeanspruchung.

### **Zukünftige Entwicklung**

Derzeit wird in der FVA der vom Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik eingebrachte Themenvorschlag /9/ diskutiert. Im Rahmen eines weiteren Forschungsvorhabens am hiesigen Fachgebiet könnten dann offene Fragen geklärt werden, die im Verlauf des gerade laufenden Forschungsvorhabens FVA-Nr. 217 sowie bei der Diskussion zum Entwurf der DIN 6892 erkannt wurden. Es handelt sich dabei um die folgenden Fragenkomplexe zu Gestaltung und Belastung von Paßfederverbindungen (PFV):

- PFV mit zwei Paßfedern
- PFV auf und in Hohlwellen
- PFV mit überlagertem Querpressverband
- PFV bei wechselnden Drehmomentrichtungen

Auch im Rahmen dieses möglichen Anschlußvorhabens können sicherlich nicht alle Fragen abschließend geklärt werden. Daher ist es wünschenswert, daß trotz der Umwidmung des Fachgebietes Maschinenelemente und Mechanik eine Möglichkeit gefunden wird, um die bisherigen Arbeiten zum Thema Paßfederverbindungen erfolgreich abzuschließen.

## Literaturangaben

- /1/ DIN 6885 - Teil 1 bis 3  
Mitnehmerverbindungen ohne Anzug - Paßfedern, Nuten
- /2/ DIN 6892 - Entwurfsfassung 1994  
Mitnehmerverbindungen ohne Anzug - Paßfedern - Berechnung und Gestaltung
- /3/ PERSEKE, W.  
Untersuchung zur Mehrfachkerbwirkung beim Zusammentreffen von Paßfedernut und Sicherungsnut  
Dissertation TH Darmstadt, 1984
- /4/ RAAB, W.  
Sonderprobleme bei spannungsoptischen Untersuchungen von Maschinenteilen  
Dissertation TH Darmstadt, 1961
- /5/ RAAB, W. und W. PERSEKE  
Übertragbarkeit spannungsoptisch gewonnener Ergebnisse auf das Verhalten von Bauteilen unter dynamischer Beanspruchung  
VDI-Berichte Nr. 480, Düsseldorf, VDI Verlag 1983, S. 195 - 200
- /6/ RAAB, W. und R. ZANG  
Beanspruchung in der Welle einer Paßfederverbindung bei statischer und dynamischer Torsionsbelastung. Vorträge der 12. Sitzung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, Deutscher Verband für Materialprüfung e. V. (DVM) Berlin 1986, S. 71 - 81
- /7/ RAAB, W., A. RENNEISEN, M. WEIGAND und V. GÜNTHER  
Beanspruchungen in Paßfederverbindungen.  
Teil 1: Paßfederverbindungen unter Torsionsbelastung. Antriebstechnik 31 (1992) Heft 6, S. 69 - 73.  
Teil 2: Paßfederverbindungen unter Biegebelastung. Antriebstechnik 31 (1992) Heft 7, S. 55 - 59.
- /8/ RAAB, W. und V. GÜNTHER  
Ermittlung der Dauerhaltbarkeit von Paßfederverbindungen  
Lfd. Forschungsvorhaben FVA-Nr. 217 (seit 1992)
- /9/ RAAB, W. und U. OLDENDORF  
Offene Fragen zu Paßfederverbindungen  
Kennwort: Dauerhaltbarkeit von Paßfederverbindungen  
Themenvorschlag an die FVA, TH Darmstadt, Februar 1994
- /10/ RENNEISEN, A.  
Die Beanspruchung von genuteten Wellen und Paßfederverbindungen  
Festschrift 25 Jahre Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik,  
TH Darmstadt 1991, S. 37 - 59

- /11/ RENNEISEN, A.  
Untersuchungen zur Beanspruchung von Paßfederverbindungen unter überlagerter Biege- und Torsionsbelastung  
Dissertation TH Darmstadt, 1993
  
- /12/ WEIGAND, M. und A. RENNEISEN  
Die Beanspruchung von Paßfederverbindungen - Literaturrecherche und -auswertung  
Forschungsheft-Nr. 317 der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt/M, 1990
  
- /13/ WEIGAND, M.  
Untersuchung der Beanspruchungen von Paßfederverbindungen bei umlaufender Biegebelastung  
Dissertation TH Darmstadt, 1991
  
- /14/ ZANG, R.  
Beanspruchung in der Welle einer Paßfederverbindung bei statischer und dynamischer Torsionsbelastung  
Dissertation TH Darmstadt, 1987



# **"Wartungsarme Kette"**

## **- Entwicklungsstand und bisherige Ergebnisse -**

**von Manfred Kraus**

### **Zusammenfassung**

In dem folgenden Beitrag sollen einige Ergebnisse aus dem am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik laufenden Forschungsvorhaben "Wartungsarme Kette" vorgestellt werden. Dabei richten sich die Betrachtungen ausschließlich auf Rollenketten mit Sinterbuchsen. Zunächst wird der Aufbau der Rollenkette und deren Verschleißverhalten näher erläutert. Anschließend werden die Ziele des Forschungsvorhabens formuliert, bevor dann die werkstoff- und oberflächentechnischen Maßnahmen zur Erreichung dieser vorgestellt werden. Der Diskussion der experimentellen Versuchsergebnisse schließt sich eine Betrachtung der Anwendungsgrenzen an. In der Schlußbetrachtung werden weitere geplante Maßnahmen vorgestellt.

### **1. Einleitung**

#### **1.1 Aufbau der Rollenkette**

Rollenketten (DIN 8187) setzen sich aus einer Folge von Innen- und Außengliedern zusammen (s. Bild 1.1). Wichtigste Kenngröße einer Rollenkette ist die Teilung  $p$ , die als Abstand zwischen den Bolzenachsen definiert ist. Ein Außenglied besteht aus je zwei Bolzen (a) und den Außenlaschen (b), wobei die Bolzen in die Außenlaschen eingepreßt und vernietet werden. Beim Innenglied werden die beiden Buchsen (c), die auch als Hülsen bezeichnet werden, in die Innenlaschen (d) eingepreßt. Auf den Buchsen sind die Rollen (e) gelagert, die sich leicht um die Buchse drehen lassen. Über das Lagerspiel zwischen Buchse und Bolzen, die zusammen das Kettengelenk bilden, wird die Beweglichkeit der Kette gewährleistet ( $/3/$  DIN).

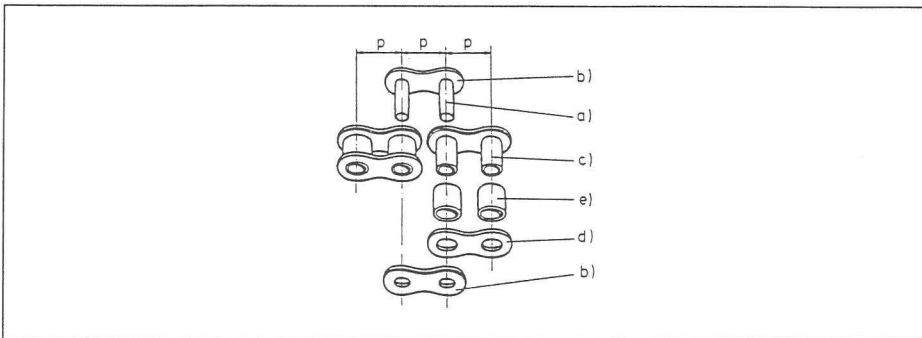


Bild 1.1: Aufbau einer Rollenkette

## 1.2 Kettenverschleiß

Als Kettenverschleiß wird üblicherweise der Gelenkverschleiß bezeichnet, der zwischen Bolzen und Buchse auftritt und zu einer Vergrößerung der Kettenteilung ( $dp$ ) gegenüber der Ausgangsteilung ( $p$ ) und damit zu einer Längung der Kette führt. Wird ein kritischer Wert von 2-3% überschritten, läuft das Kettenglied nicht mehr in die Zahnluke des Kettenrades ein, sondern schlägt auf den Zahnkopf auf (/9/ RACHNER).

In Bild 1.2 ist die Verschleißkennlinie einer Rollenkette qualitativ dargestellt. Als Maß für den Verschleiß der Rollenketten ist dabei die relative Teilungszunahme (Kettenlängung)  $dp/p$  über der Versuchsdauer aufgetragen.

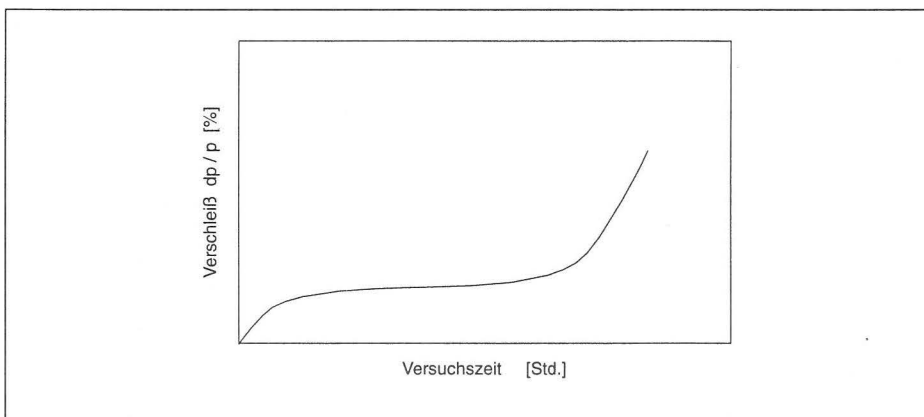


Bild 1.2: Verschleißkennlinie einer Rollenkette



Die Kette wird über die gesamte Betriebsdauer möglichst kontinuierlich und mit ausreichend Schmierstoff nachgeschmiert. Während der ersten Betriebsstunden nimmt der Verschleiß degressiv zu. Dieser sogenannte Einlaufverschleiß wird durch die Einebnung von Oberflächenrauheiten, das Sätzen der Preßverbindungen und den Ausgleich fertigungsbedingter Formabweichungen verursacht. An die Einlaufphase schließt sich ein etwa linear verlaufender Verschleißbereich an, der nach dem Abtragen der Härteschicht an Bolzen und Buchse in einen progressiven Bereich übergeht (/7/ MM).

## 2. Ziele des Forschungsvorhabens

Die Anforderungen an eine Rollenkette lassen sich mit dem Begriff "Wartungsarme Kette" zusammenfassen. Das Forschungsvorhaben "Wartungsarme Kette" beinhaltet zwei Ziele:

- Verringerung der verschleißbedingten Kettenlängung
- Reduzierung der eingesetzten Schmierstoffmenge

## 3. Maßnahmen zur Erreichung der Ziele

Eine Einsparung des Schmierstoffes ist nur dann möglich, wenn die Schmierintervalle verlängert, die während des Betriebes zur Nachschmierung eingesetzte Schmierstoffmenge verringert oder ganz auf eine Nachschmierung verzichtet wird. Es ist denkbar, die Kette während der gesamten Gebrauchsdauer nur mit Schmierstoff aus einer sogenannten Anfangsschmierung zu versorgen, dadurch entfällt die Nachschmierung während des Betriebes sowie etwaige Anlagen zu deren Aufrechterhaltung.

Mit Hilfe eines porösen Buchsenwerkstoffes, wie z.B. Sinterwerkstoff, kann die Buchse als Schmierstoffspeicher zur Aufnahme der Anfangsschmierung genutzt werden, um eine sogenannte Selbstschmierung der Kette zu ermöglichen.

Der erforderliche Sinterwerkstoff muß einerseits den Schmierstoff aufnehmen und andererseits möglichst über die Festigkeitseigenschaften der bisherigen Buchse (C 15, einsatzgehärtet) verfügen, um diese zu substituieren.

Neben den genannten Anforderungen werden von porösen Sinterwerkstoffen noch zwei weitere wesentliche Anforderungen erfüllt. Zum einen verhindert ein poröser Sinterwerkstoff aufgrund der in den Poren der Buchse wirkenden Kapillarkräfte einen größeren Schmierstoffverlust der Buchse während des Betriebes, so daß auf eine Abdichtung verzichtet werden kann. Zum anderen sorgt ein sinterwerkstoffspezifischer Selbstschmiereffekt dafür, daß immer eine der Belastung der Buchse proportionale Schmierstoffmenge für die Gelenkschmierung zur Verfügung steht (/10/ RÜBENACH).

### 3.1 Selbstschmierungseffekt im Gelenk einer Sinterbuchsenkette

Da es sich bei der Bewegung im Kettengelenk um eine oszillierende Schwenkbewegung unter Last handelt, kann sich im Gelenk keine hydrodynamische Schmierung, sondern nur ein Mischreibungszustand ausbilden. Außerdem ist der Schwenkwinkel zu gering, um einen Unterdruck zu erzeugen, mit dem dann die Kapillarwirkung der Poren überwunden und ausreichend Schmierstoff aus der Buchse angesaugt werden kann (/4/ KLEPZIG).

Trotzdem erfolgt - sobald das Gelenk durch die Kraft  $F$  (vgl. Bild 3.1) belastet wird - eine Selbstschmierung der Buchse. Dabei drückt der Bolzen hauptsächlich an den Positionen (1) und (2) gegen die Buchse, wie in Bild 3.1 gezeigt wird.

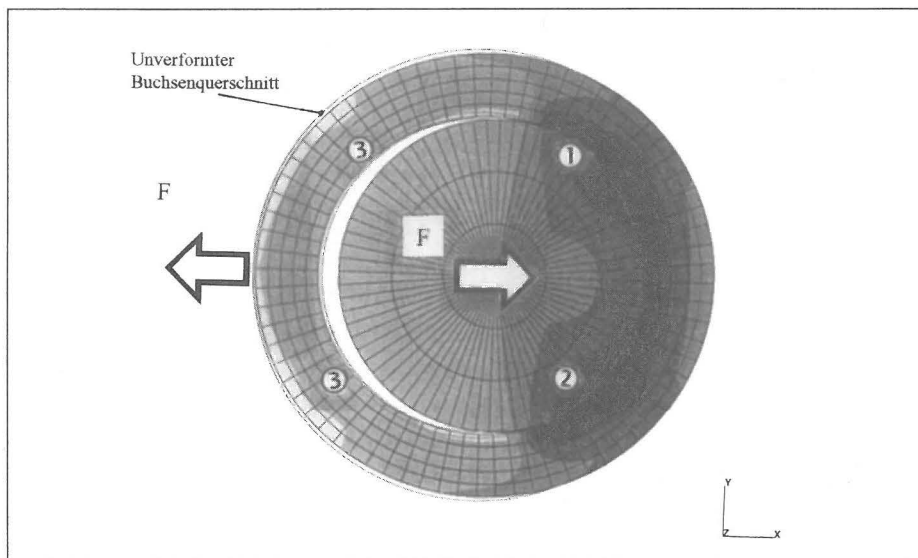


Bild 3.1: Radialspannungsbildung in der Kontaktzone zwischen Buchse und Bolzen

Die Innenlasche - die vergleichbar mit einem Augenstab ist (/9/ RACHNER) - verformt sich zusammen mit der in ihr eingepreßten Buchse oval, wie sich aus dem Vergleich mit dem unverformten Querschnitt ergibt. Da der Bolzenquerschnitt auch unter Zugbelastung des Gelenkes seine Kreisform beibehält, drückt dieser an den genannten Stellen gegen die Buchse.

Die Verformung der Buchse an den Kontaktstellen (1) und (2) ist elastisch. Dabei nehmen die Radialspannungen in der Buchse zu (/1/ BRUNNÉ). Dies führt zu einer Erhöhung der Dichte und somit zu einer Verdrängung des in den Poren des Kontaktbereiches befindlichen Schmierstoffes.

Da in porösen Sinterwerkstoffen ein Großteil der Poren durch Kanäle miteinander verbunden ist (/11/ SCHATT), wird der aus dem Kontaktbereich verdrängte Schmierstoff in andere Bereiche der Buchse gedrückt und verdrängt den dort befindlichen Schmierstoff. Dadurch kann an den kraftfreien Oberflächen der Buchse, vornehmlich aus der Buchseninnenoberfläche, der Schmierstoff austreten und die Schmierung des Gelenkes bewirken, siehe Position (3) in Bild 3.1.

Nach Entlastung des Gelenkes im Leertrum fließt der Schmierstoff in die Poren zurück. Beim Durchlaufen des Lastrumes wiederholt sich der Vorgang. Je stärker die aufgebrachte Zugkraft, umso stärker ist die Verdrängung des Schmierstoffes in der Kontaktzone der Buchse und umso mehr Schmierstoff gelangt in das Gelenk (/11/ SCHATT). Die "Leckage" des Gelenkes ist dabei sehr gering, da die im Gelenk zirkulierenden Schmierstoffmengen sehr klein sind.

### **3.2 Schmiermittel und Werkstoffe für die Sinterbuchse sowie Bolzenwerkstoff**

Nach dem Sintern und vor der Montage der Buchsen in der Kette werden diese mit Mineralölen imprägniert, welche Li- und Al-Seifen enthalten. Die Seifen verbessern die Ausbildung eines dünnen Schmierfilmes im Gelenk und verringern die Reibung im Gelenk.

Für die Buchse werden Gleitlagerwerkstoffe auf Fe- und CuSn-Basis mit Porositäten von 20 bis 25% verwandt (/10/ RÜBENACH).

Sintergleitlager arbeiten mit dünnen Ölfilmen. Damit bereits kleine Schmierstoffmengen zu einer Trennung der beiden Reibpartner beitragen können, sollte die Rauhtiefe des Bolzens möglichst gering sein. Wird jedoch eine von der Viskosität des Schmierstoffes abhängige Mindestrauhtiefe unterschritten, vermindert sich die Haftfähigkeit des Öls (/6/ LÖRMER, /10/ RÜBENACH).

Die Verschleißfestigkeit des Gegenlaufwerkstoffes (einsatzgehärteter Bolzen) kann durch eine chemische Vernickelung gesteigert werden. PAWLIK (/8/ PAWLIK) hat eine Verschleißreduzierung bis zu 50% bei tropfölgeschmierten Standardketten (gewickelte Buchse, einsatzgehärteter Bolzen) durch chemisch vernickelte Kettenbolzen gegenüber Bolzen ohne Verschleißschuttschicht nachgewiesen.

## 4. Versuchsergebnisse

### 4.1 Verschleißverhalten der Sinterbuchsenkette

Ziel der bisher am Fachgebiet durchgeführten Versuche an Sinterbuchsenketten war es, die Anwendungsgrenzen einer solchen Kette zu ermitteln.

Um die gewonnenen Versuchsergebnisse mit denen von geschmierten Standardketten vergleichen zu können, wurden für die Versuche mit den Sinterbuchsenketten die gleichen Versuchsbedingungen gewählt.

In Bild 4.1 sind für eine kontinuierlich mit 4 Tropfen/min geschmierte Standardkette und eine nur mit Anfangsschmierung imprägnierte Sinterbuchsenkette die Verschleißkennlinien - jeweils basierend auf den Verschleißkennlinien aus vier Versuchen - für Kettengeschwindigkeiten von 4 und 8 m/sec dargestellt.

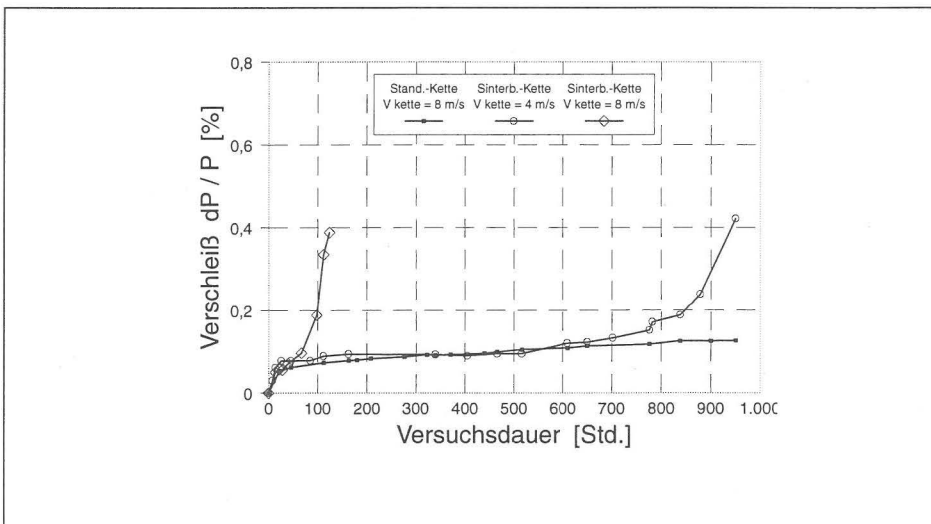


Bild 4.1: Verschleißkennlinien der Sinterbuchsenkette bei verschiedenen Kettengeschwindigkeiten und einer Standardkette unter gleichen Versuchsbedingungen aber mit Tropfölschmierung während des Versuches

Versuchsbedingungen:

$v_{\text{Kette}} = 4 \text{ m/sec}$ ,  $P = 4,7 \text{ kW}$ ,  $n_1 = 1000 \text{ U/min}$ ,  $M_1 = 45 \text{ Nm}$ ,  $z_1 = 19$ ,  $z_2 = 57$

$v_{\text{Kette}} = 8 \text{ m/sec}$ ,  $P = 9,4 \text{ kW}$ ,  $n_1 = 2000 \text{ U/min}$ ,  $M_1 = 45 \text{ Nm}$ ,  $z_1 = 19$ ,  $z_2 = 57$

Die Sinterbuchsenketten erreichen bei einer Kettengeschwindigkeit von 8 m/sec eine Versuchsdauer von 120 Stunden und bei einer Kettengeschwindigkeit von 4 m/sec eine Versuchsdauer von 950 Stunden. Danach waren einzelne Buchsen der Ketten zerbrochen, woraufhin die Versuche abgebrochen werden mußten. Bis zu einer Versuchsdauer von etwa 700 Stunden hat die Sinterbuchsenkette mit einer gegenüber der geschmierten Standardkette halbierten Kettengeschwindigkeit eine äquivalente Verschleißlänge von 0,1%, siehe Bild 4.1.

#### 4.2 Ausfallursachen und Anwendungsgrenzen

Im Unterschied zu einer tropfölgeschmierten Standardkette, bei der alle Glieder nahezu gleichmäßig verschleifen, wird der Ausfall der Sinterbuchsenkette durch einzelne Glieder bestimmt. Die Festigkeitseigenschaften der Sinterbuchse streuen stärker als bei einer Standardkette, dadurch kommt es bei einer Sinterbuchsenkette nie zum gleichzeitigen Ausfall aller Gelenke. Vielmehr fallen die schwächsten Buchsen zuerst aus (/2/ DENNER).

Im Rahmen der Versuche konnten zwei Ausfallursachen der Buchse beobachtet werden:

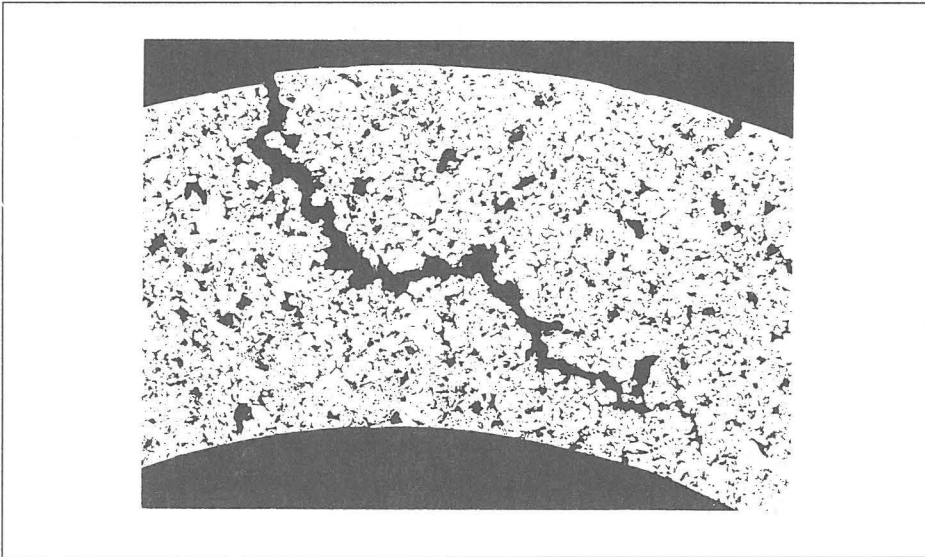
- a. Austritt des Schmierstoffes aus den porösen Sinterbuchsen bei hohen Geschwindigkeiten
- b. Zerstörung der Buchse durch geschwindigkeitsabhängigen Stoß des Kettenrades beim Einlauf der Kette in das Antriebsrad

zu a.

Durch den starken Fliehkrafteinfluß werden bei Kettengeschwindigkeiten von 8 m/sec während der ersten 40 Versuchsstunden beträchtliche Mengen des Schmierstoffes aus den Gelenken geschleudert, wodurch der Schmierstoffvorrat in der Buchse stark dezimiert wird. Infolgedessen fällt nach kurzer Zeit die Gelenkschmierung aus, was zu Reibrostbildung und zum Klemmen des Gelenkes sowie zu einer erhöhten Geräuschentwicklung beim Betrieb der Kette führt. Bei einer Kettengeschwindigkeit von 4 m/sec treten nur unbedeutende Mengen des Schmierstoffes aus den Buchsen, die der normalen "Leckage" des Gelenkes zugeordnet werden können.

zu b.

Der Einlaufstoß, resultierend aus der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen rotierendem Antriebsrad und translatorisch bewegter Kette, bewirkt ein Aufschlagen der Kettenbuchse auf die Zahnflanke des Antriebsrades, was verantwortlich für das typische Laufgeräusch einer Kette ist (/5/ LINDE). Der Einlaufstoß, dessen Intensität proportional zur Kettengeschwindigkeit ist, führt zu Mikroanrissen auf der Buchsenaußenoberfläche. Die entstehenden Risse laufen dann radial in Richtung der Buchseninnenwand, wie in Bild 4.2 anhand eines Querschliffes durch die Buchse zu erkennen ist (/2/ DENNER).



*Bild 4.2: Rißbeginn an der Außenoberfläche einer Sinterbuchse*

Durch die entstehenden Risse wird der in der Buchse befindliche Schmierstoff freigesetzt und steht nicht mehr zur Schmierung des Gelenkes zur Verfügung. Das beschleunigt den Ausfall der Buchse weiter.

Die gleichzeitige Erfüllung der gegenläufigen Forderungen - ausreichende Dauerfestigkeit der Buchse bei möglichst großem Porenraum zur Aufnahme des Schmierstoffes - führt zu einem Kompromiß bei der Wahl des geeigneten Sinterwerkstoffes, woraus eine, im Vergleich zur Standardkette, erhöhte Stoßempfindlichkeit der Buchse resultiert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß bei Einsatz einer Sinterbuchsenketten mit Kettengeschwindigkeiten von 4 m/sec und weniger beträchtliche Schmierstoffeinsparungen erzielt werden können.

Die Anwendungsgrenze wird nach dem bisherigen Stand der Untersuchungen durch die Kettengeschwindigkeit bestimmt, weil die oben genannten Ausfallursachen eine Funktion der Kettengeschwindigkeit sind.

## 5. Ausblick

In Zukunft muß das Verschleißverhalten bei Geschwindigkeiten von weniger als 4 m/sec und bei höheren Lastmomenten untersucht werden, um dabei die auftretenden Ausfallursachen zu ermitteln. Gleichzeitig richten sich die Bemühungen darauf, die Dauerfestigkeit der Buchse zu erhöhen, um die Gebrauchsdauer der Kette weiter zu steigern. Dazu soll der Einfluß der Form und der Zusammensetzung des verwendeten Pulvers auf die Festigkeit der Buchse und die Porenform untersucht werden.

### Literatur

- |      |          |                                     |  |
|------|----------|-------------------------------------|--|
| /1/  | BRUNNÉT  | Brunnét, G.                         | Dimensionierung von Kettengelenkbauteilen mit FE-Methoden,<br>Diplomarbeit am FG Masch.el. u. Mech., TH Darmstadt 1994   |
| /2/  | DENNER   | Denner, R.                          | Metallurgische Untersuchungen von Kettengelenkbauteilen,<br>Studienarbeit am FG Masch.el. u. Mech., TH Darmstadt 1994  |
| /3/  | DIN      |                                     | DIN 81 87, Rollenketten, Europäische Bauart.<br>Berlin: Beuth Verlag, August 1972  |
| /4/  | KLEPZIG  | Klepzig, M.                         | Untersuchung des Entwicklungspotentials für eine wartungsarme Kette,<br>Studienarbeit am FG Masch.el. u. Mech., TH Darmstadt 1994  |
| /5/  | LINDE    | v. d. Linde, J.                     | Die Schallabstrahlung von Rollenketten,<br>Dissertation TH Aachen 1964   |
| /6/  | LÖRMER   | Lörmer, M.                          | Wartungsfreie Sintergleitlager,<br>Haus der Technik - Vortragsveröffentlichung Nr. 393, Seite 4 bis 9<br>Vulkan - Verlag Dr. W. Classen  |
| /7/  | MM       | Raab, W.<br>Dörsam, E.<br>Kraus, M. | Kein Stillstand,<br>Maschinenmarkt Nr. 47/92, Seite 58 bis 63  |
| /8/  | PAWLIK   | Pawlik, C. A.                       | Untersuchung über den Einfluß unterschiedlich oberflächenbehandelter Bolzen-/Buchsen-Paarungen auf das Verschleißverhalten von Rollenketten,<br>Dissertation TH Darmstadt 1990 |
| /9/  | RACHNER  | Rachner, H. G.                      | Stahlgelenkketten und Kettengetriebe,<br>Berlin, Göttingen, Heidelberg, Springer 1962  |
| /10/ | RÜBENACH | Rübenach, F.                        | Sintermetall-Gleitlager,<br>powder metallurgy international vol 15, no. 3, 1983, Seite 20 bis 24   |
| /11/ | SCHATT   | Schatt, W.                          | Pulvermetallurgie Sinter- und Verbundwerkstoffe,<br>Leipzig, Dt. Verlag f. Grundstoffindustrie, 1988   |





# Erkenntnistheorie und Ingenieurwissenschaften

von Johannes Hain

"Experimentieren ist planmäßiges Handeln beherrscht von der Theorie. Wir stolpern nicht über Erfahrungen, wir lassen sie auch nicht über uns ergehen wie einen Strom von Erlebnissen, sondern wir machen unsere Erfahrungen; *wir* sind es, die die Frage an die Natur formulieren; *wir* versuchen immer wieder, die Frage mit aller Schärfe auf 'Ja' und 'Nein' zu stellen - die Natur antwortet nicht, wenn sie nicht gefragt wird - und schließlich sind es ja doch nur *wir*, die die Frage beantworten; *wir* setzen die Antwort fest, nach der wir die Natur fragten, wenn wir die Antwort streng geprüft, uns lang und ernstlich gemüht haben, die Natur zu einem eindeutigen 'Nein' zu bewegen." (Popper 1984, S. 224)

## 1 Gegenstand der Erkenntnistheorie und Einordnung in das Wissenschaftssystem

Ziel jeder Wissenschaft ist die Gewinnung von Erkenntnissen über einen bestimmten Bereich. Dabei können Wissenschaften unterschieden werden, die sich mit Erkenntnissen über 'reale' Systeme beschäftigen (z. B. Physik, Chemie, Biologie, Sozialwissenschaften, Ingenieurwissenschaften u. a.), Wissenschaften, die sich mit 'formalen' Systemen beschäftigen (z. B. Mathematik, Systemtheorie, Kybernetik, Sprachwissenschaften u. a.) sowie Wissenschaften, die sich mit Wissenschaften an sich beschäftigen (z. B. Wissenschaftstheorie). Diesen zuletzt genannten Wissenschaften, die auch als "Metawissenschaften" bezeichnet werden können (vgl. z. B. bei VOLLMER 1987, S. 112), ist die Erkenntnistheorie zuzuordnen; Gegenstand der Erkenntnistheorie sind Erkenntnisse über Erkenntnis.

Die Fragestellungen:

- Wie kommt menschliche, insbesondere wissenschaftliche, Erkenntnis zustande?
- Wo liegen die Grenzen menschlicher Erkenntnis?
- Wie sicher kann menschliche Erkenntnis sein?

sind typische Problemstellungen der Erkenntnistheorie. Im Vorwort zur ersten englischen Ausgabe seines Werkes 'Logik der Forschung' stellt POPPER (1984, S. XIV) als "zentrales Problem der Erkenntnislehre ... das Problem des Wachstums oder des Fortschritts unseres Wissens dar".

In Bezug zur Philosophie, die sich in einer übergeordneten Weise mit unserer Welt auseinandersetzt und versucht diese zu verstehen und zu erklären, kann die Erkenntnistheorie als Teildisziplin der Philosophie interpretiert werden, wobei die Erkenntnistheorie den Bereich 'reiner'

Philosophie dahingehend verläßt, daß Erkenntnisse anderer Wissenschaftszweige, z. B. der Naturwissenschaften, berücksichtigt werden.

Insbesondere in den Naturwissenschaften waren (und sind) erkenntnistheoretische Betrachtungen von jeher von großer Bedeutung, da neue Entdeckungen in vielen Fällen zum Zweifel an, in einigen Fällen sogar zur Abkehr von, bis dahin als 'wahr' anerkannter Weltanschauungen führten. Beispiele für solche Wendepunkte sind der Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild ('Kopernikanische Wende'), die 'Darwin'sche Revolution', die den Ansatz von der Evolution der Arten auf ein theoretisches Fundament stellte und dem Schöpfungsglauben in seiner bis dahin vorliegenden Form widersprach, oder die Relativierung des von Newton entworfenen mechanistischen Weltbildes durch die Theorien von Einstein und Heisenberg. Und auch diese Theorien besitzen nur den Charakter von Hypothesen und 'warten' auf ihre Falsifizierung.

Dieser enge Zusammenhang zwischen Erkenntnistheorie und Naturwissenschaften wird auch daran deutlich, daß sich viele Physiker mit den philosophischen Problemen der Physik auseinandersetzten (vgl. z. B. BOHR 1958; HEISENBERG 1984; WEIZÄCKER 1970).

## 2 Ansätze der Erkenntnistheorie

### 2.1 Klassische Ansätze

Ohne auf fundamentale philosophische Standpunkte einzugehen, die sich bereits an der Diskussion, ob eine reale Welt tatsächlich existiert, oder ob die Welt nur ein Trugbild unserer Gedanken ist, entzünden, sollen im folgenden von der Annahme der Existenz einer realen Welt ausgehend, grundlegende philosophische Ansätze zum Erkenntnisgewinn dargestellt werden.

Die beiden grundsätzlichen Standpunkte zum Erkenntnisgewinn, die in den verschiedenen philosophischen Theorien in mehr oder weniger strenger Form vertreten wurden, sind der Empirismus und der Rationalismus. Während die Vertreter des Empirismus (z. B. Bacon, Locke, Hume) davon ausgehen, daß alle Erkenntnis letztlich der Erfahrung entstammt, daß es keine angeborenen Ideen gibt und daß demzufolge, wie LOCKE sagt "nichts im Verstand ist was nicht vorher in den Sinnen war", manifestiert sich die Auffassung der Rationalisten darin, daß Erkenntnisgewinn allein durch das Denken, auf der Grundlage angeborener Ideen, möglich ist. Vertreter des Rationalismus sind z. B. Descartes oder Leibniz.

Die Kluft zwischen dem strengen Empirismus und dem strengen Rationalismus wurde im Jahre 1781 durch Kants 'Kritik der reinen Vernunft' (KANT, 1982) dahingehend überbrückt, daß nach Kants Auffassung zwar die Erfahrungen Ausgangspunkt aller Erkenntnis sind, das Nebeneinander von Erfahrungen jedoch zum einen durch im Menschen vorhandene Kategorien verknüpft wird, zum anderen der empirische Erfahrungsgewinn durch bereits vorhandene Anschauungsformen erst möglich wird. Kant spricht in diesem Zusammenhang der Kategorien und der Anschauungsformen von den 'A Priori' der Erkenntnis.

Mit der Aussage "die Vernunft muß mit ihren Prinzipien, nach denen allein übereinkommende Erscheinungen für Gesetz gelten können, in einer Hand und mit dem Experiment, das sie nach

jenen ausdachte, in der anderen, an die Natur herangehen" (KANT 1982, S. 23) begründet Kant die Notwendigkeit, den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn als Einheit von Empirismus und Theorie zu begreifen.

Hinsichtlich der Bedeutung dieser beiden sich ergänzenden Vorgehensweisen für den Erkenntnisfortschritt, schließt sich der Autor den Ansichten Poppers an, der in seinem Werk 'Logik der Forschung' (POPPER 1984) aufzeigt, daß der induktive Schluß von empirischen Erkenntnissen auf die Richtigkeit einer Theorie nicht zulässig ist - "Theorien sind nicht verifizierbar, aber sie können sich bewähren" (POPPER 1984, S. 198). Empirische Ergebnisse sind vielmehr ein Mittel, aufgestellte Hypothesen zu überprüfen und eventuell zu falsifizieren. In diesem Sinne begreift Popper den Erkenntnisfortschritt als "natürliche Auslese von Hypothesen" (POPPER 1973, S. 288). Treibende Kraft der Erkenntnis sind demzufolge die durch das Denken entstandenen Hypothesen, die sich an den Prüfsteinen der Empirie bewähren müssen. Vorhandenes Wissen kann nur soweit als 'sicher' bezeichnet werden, als es Falsifizierungsversuchen standgehalten hat - "all unser Wissen ... insbesondere alle Wissenschaft [ist] hypothetisch" (VOLLMER 1987, S. 28).

## 2.2 Modernere erkenntnistheoretische Ansätze

Während die in Abschn. 2.1 genannten Ansätze (mit Ausnahme der Betrachtungen von Popper), im Sinne einer Verwendung von deren Erkenntnissen, zumeist nur geringen Bezug zu 'praktischen' Wissenschaften haben und eher der klassischen Philosophie zuzurechnen sind, zeichnen sich modernere erkenntnistheoretische Ansätze dadurch aus, daß Wissenschaften wie Mathematik, Physik, Biologie, Psychologie u. ä. zur Klärung erkenntnistheoretischer Fragestellungen herangezogen werden.

Da in Abschn. 4.2 insbesondere Aspekte der auf biologischen Zusammenhängen basierenden evolutionären Erkenntnistheorie im Hinblick auf Analogien zu ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen aufgezeigt werden, beschränkt sich dieser Abschnitt auf eine Skizze der Grundidee dieser Theorie.

Ausgangspunkt der evolutionären Erkenntnistheorie ist der Gedanke, "daß sich die menschliche Erkenntnisfähigkeit in Wechselwirkung mit der Umwelt und in der Anpassung an diese [im Verlaufe der biologischen Evolution] herausgebildet hat" (VOLLMER 1987, S. 56). Dabei wird jede Anpassung an die Realität als Informationszuwachs des jeweiligen Systems über die Realität und somit gewissermaßen als Erkenntniszuwachs interpretiert (vgl. LORENZ 1988, S. 15).

Diese Sichtweise des Evolutionsprozesses als erkenntnisgewinnenden Prozeß läßt es zum einen zu, Grundprinzipien biologischen Erkenntnisgewinns sowie die Evolution desselben mit dem Ziel zu analysieren, diese Prinzipien auf den Erkenntnisgewinn an sich zu übertragen (vgl. RIEDL 1980, S. 23); andererseits ermöglicht diese Betrachtungsweise die 'Lösung' (zumindest in Form einer Hypothese) des philosophischen Problems, warum Denkkategorien und Realkategorien so gut aufeinander passen (vgl. dazu VOLLMER 1987, S. 5). "Aus denselben Gründen [nämlich], aus denen die Form des Pferdehufs auf den Steppenboden und die der Fischflosse ins Wasser paßt ..." (LORENZ 1943, S. 352). D. h. die Übereinstimmung ergibt sich aus der Sicht der evolutionären Erkenntnistheorie daraus, daß sich der menschliche Erkenntnisapparat in Anpassung an die Umwelt entwickelt hat (vgl. VOLLMER 1987, S. 97 ff.), ohne die "wir die Evolution ... nicht überlebt hätten" (VOLLMER 1987, S. 106).

### 3 Was haben Ingenieurwissenschaften mit erkenntnistheoretischen Fragestellungen zu tun?

Wenn von den zuvor angesprochenen erkenntnistheoretischen Fragestellungen wie den Grenzen menschlicher Erkenntnis, dem hypothetischen Charakter des menschlichen Wissens sowie von Fragestellungen, die die Erweiterung unserer Erkenntnis betreffen, die Rede ist, beziehen sich diese Aussagen zumeist auf übergeordnetes Wissen unser physikalisches Weltbild betreffend. Die Ingenieurwissenschaften, d. h. die angewandten Wissenschaften, deren Ziel die Entwicklung von Systemen (z. B. Bauwerken, Maschinen, biologischen oder chemischen Systemen) zur Bewältigung der Lebensaufgaben des Menschen ist, werden von solchen Fragestellungen zumeist wenig tangiert.

Dennoch müssen für den Erkenntnisgewinn in diesen Disziplinen die gleichen Überlegungen gelten, wie für Erkenntnisse, die auf einer übergeordneten Ebene unser Weltbild bestimmen. Auch hier gilt das Postulat, daß jegliches Wissen hypothetisch ist, daß dessen Aussagekraft letzten Endes durch die Möglichkeit der Falsifizierung und durch die Bewährung bestimmt wird, wobei Wissenschaft weder "Wahrheit noch Wahrscheinlichkeit erreichen kann" (POPPER 1984, S. 223), sowie die gegenseitige Ergänzung von Empirie und Theorie mit der Theorie als treibender Kraft. BANSE/WENDT (1986, S. 28) betonen in ihren Ausführungen zu 'Erkenntnismethoden in den Technikwissenschaften', daß "innerhalb der dialektischen Einheit von Empirischem und Theoretischem ... das Theoretische zunehmend an Bedeutung für die Antizipation von Neuem [gewinnt].... Empirie allein führt in der Gegenwart - wenn überhaupt - nur zu zeitweiligen Vorteilen".

Unterteilt man ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen in die interdependenten, jedoch auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen operierenden Bereiche, 'Erklärung bestehender Sachverhalte' und 'Kreation von Neuem', so können in beiden Bereichen Problemstellungen identifiziert werden, bei deren Beantwortung erkenntnistheoretische Grundprinzipien zu beachten sind bzw. erkenntnistheoretische Ansätze von Nutzen sein können. BANSE/WENDT (1986, S. 9) sprechen von "regulativen Prinzipien und Anweisungen für Bearbeiter wissenschaftlicher Probleme zur Durchführung geistiger (und praktischer) Operationen". Nachfolgend sind exemplarisch typische Fragestellungen aufgelistet.

#### **Erklärung bestehender Sachverhalte:**

- Welche Ursachen liegen einem beobachteten Sachverhalt zugrunde?
- Durch welche unabhängigen Variablen wird eine abhängige Variable wie beeinflusst?
- Wie groß ist die Sicherheit getroffener Aussagen?
- Kann ein erkannter Sachverhalt auf andere Probleme übertragen werden?

#### **Kreation von Neuem:**

- Wie wird sich ein neues System in der Realität verhalten?
- Durch welche Systemkonfiguration kann eine erwünschte Wirkung erzielt werden?
- Wie wird die Umwelt eines zu konzipierenden Systems aussehen?
- Inwieweit sind frühere Erfahrungen im vorliegenden Fall übertragbar?

In den nachfolgenden Kapiteln werden Möglichkeiten zur Übertragung erkenntnistheoretischer Ansätze dargestellt. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt dabei auf der Kritik an bestehenden Vorgehensweisen in den Ingenieurwissenschaften.

## **4 Exemplarische Übertragung erkenntnistheoretischer Ansätze auf ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen**

Die folgende Übertragung von Ansätzen der Erkenntnistheorie auf die Ingenieurwissenschaften geht zunächst von 'klassischen' Ansätzen der Erkenntnistheorie aus (Abschn. 4.1). In Abschn. 4.2 werden dann Ansätze der 'modernen' evolutionären Erkenntnistheorie analysiert.

### **4.1 Die Ergänzung von Empirie und Theorie und die 'Induktionsmentalität' empirischer Untersuchungen.**

Das Zusammenwirken von Empirie und Theorie mit der Theorie als treibendem und der Empirie als überprüfendem Moment, welches in den Ausführungen in Abschn. 2.1 als grundsätzliches Prinzip des Erkenntnisgewinns dargestellt wurde, kann in den Ingenieurwissenschaften in mannigfaltiger Weise wiedergefunden werden.

In seiner Reinform konkretisiert sich das Prinzip bei jeglicher Art experimenteller Untersuchungen, die das Ziel verfolgen, Zusammenhänge zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen aufzuzeigen, zu analysieren und zu erklären. Hier muß jeder Untersuchung eine Hypothese (Theorie) vorausgehen, von der ausgehend, ein Versuchsaufbau zu wählen ist, der diese empirisch falsifizieren könnte. Der Einwand, daß doch manchmal erst ausgehend von einer empirischen Untersuchung Ansätze für eine Hypothese gewonnen werden können, stellt dabei keinen Widerspruch zur vorangegangenen Aussage dar. Da der ursprüngliche Versuchsaufbau ausgehend von einer Hypothese erfolgt sein muß (eine durch Würfeln bestimmte Versuchsanordnung erscheint wenig sinnvoll), und die durch diesen Versuch erreichten Denkanstöße wiederum nur eine Hypothese darstellen, sind diese ebenfalls am Prüfstand der Empirie zu messen.

Aber auch bei ingenieurwissenschaftlichen Tätigkeiten, die in die Kategorie 'Kreation von Neuem' fallen, findet sich das Prinzip wieder. Die gedankliche Vorwegnahme künftiger Systeme in Bereichen, die gemeinhin mit Planung, Konstruktion, Entwicklung o. ä. bezeichnet werden, entspricht der Aufstellung von Modellen, die Hypothesen über ein System beinhalten. Diese Hypothesen werden dann nach Realisierung des Systems quasi einer empirischen Prüfung durch die Realität unterworfen. Besteht das System die Prüfung, hat sich die Hypothese bewährt, was jedoch nicht bedeutet, daß damit das der Realität am besten entsprechende System gefunden ist.

So gut die Grundprinzipien des Erkenntnisgewinns wie gezeigt auch auf ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen anwendbar sind, so werden sie in der Praxis oft falsch interpretiert, nur ungenügend beachtet oder gar völlig vernachlässigt.

Im zuerst genannten Bereich der Erklärung von Sachverhalten äußert sich dies z. B. in der Durchführung empirischer Untersuchungen, denen nur unzureichende theoretische Vorüberlegungen zugrunde liegen, was dann oftmals zu eher zufallsbedingten bzw. unsystematischen Parametervariationen führt, deren Ergebnisse dann zu guter Letzt dazu herangezogen werden, eine neue Theorie zu begründen anstatt eine vorangegangene zu überprüfen.

Ebenso ist häufig zu beobachten, daß davon gesprochen wird, eine Theorie mit Hilfe eines Experimentes verifizieren zu wollen - was wie oben dargestellt nicht möglich ist; die Tendenz des Ingenieurs das Induktionsprinzip, d. h. den Schluß vom Speziellen (in diesem Fall einer empirischen Untersuchung) auf das Allgemeine (in diesem Fall die Theorie) anzuwenden, ist unverkennbar.

In diesem Zusammenhang typische Problemfälle sind aus empirischen Untersuchungen mittels mathematisch-statistischer Methoden abgeleitete Zusammenhänge, die zwar einer fundierten theoretischen Grundlage entbehren, in Form einer mathematischen Formulierung jedoch eine Genauigkeit und Absolutheit suggerieren, die den Anwender des auf diese Weise entstandenen 'Gesetzes' zu einer kritiklosen, potentielle Anwendungsgrenzen vernachlässigenden Verwendung veranlaßt. Insbesondere in den Ingenieurwissenschaften, in denen viele Zusammenhänge mit Hilfe der Mathematik beschrieben werden, z. B. in Form von Auslegungs- bzw. Dimensionierungsformeln, besteht die große Gefahr, daß ein für einen eng abgegrenzten Bereich selektiertes Werkzeug losgelöst von seiner Herkunft auf Sachverhalte übertragen wird, die dessen Gültigkeitsbereich überschreiten - hier ist vor allem die Ingenieurausbildung gefordert.

In die gleiche Richtung geht die häufig zu beobachtende 'Unsitte', jegliches Vorgehen, jegliche Methode und jegliche Verfahren, so unsinnig dies im Einzelfall auch sein mag, mittels EDV unterstützen zu wollen - ein simples Punktbewertungsverfahren wird auf diese Weise zu einem 'Decision Support Tool', eine Auslegungsformel zum 'Engineering Assistant'. Daß einem Rechnerausdruck mehr Glauben zu schenken ist, als Ergebnissen, die ohne EDV-Unterstützung erzielt wurden, scheint jedenfalls eine weitverbreitete Meinung zu sein (vgl. auch HAIN 1993).

Im Bereich der Kreation neuer Systeme kann eine unzureichende Berücksichtigung erkenntnistheoretischer Prinzipien insbesondere im Bereich der Empirie, d. h. der Prüfung der Bewährung eines Systems in der Realität, festgestellt werden. Die Prüfung eines Systems dahingehend, inwieweit die im Modell repräsentierten hypothetischen Ausprägungen der Merkmale mit den Eigenschaften des realen Systems übereinstimmen und die Prüfung, welche unvorhergesehenen erwünschten bzw. unerwünschten Eigenschaften auftreten, wird oft nur unzureichend durchgeführt - das Feedback zwischen Praxis und Entwicklung ist oft nicht vorhanden. BANSE/WENDT (1986, S. 169) führen in diesem Zusammenhang eine Reihe von Gründen auf, "die eine 'Verlängerung' des gezielten technikwissenschaftlichen Erkenntnisprozesses (Forschungsprozesses) bis in die Phase der industriellen Praxis hinein erforderlich machen".

#### **4.2 Die Anwendung von Ansätzen der evolutionären Erkenntnistheorie in den Ingenieurwissenschaften**

In Abschn. 2.2 wurde bereits die Grundidee der Vertreter der evolutionären Erkenntnistheorie skizziert. An dieser Stelle sollen nun Ansätze des Biologen RIEDL (1980), welcher sich mit dem System biologischen Erkenntnisgewinns auseinandersetzt, im Hinblick auf ihre Übertragbarkeit auf den Erkenntnisgewinn in den Ingenieurwissenschaften untersucht werden. Ein

ähnlicher Ansatz, ebenfalls bezugnehmend auf RIEDL (1980) wurde auch schon bei RODENACKER (1988; vgl. auch 1990) verfolgt. Dabei lag der Schwerpunkt darauf, biologisch gegebene Strukturen des Menschen aufzuzeigen, die ihn zur Lösung von Problemen, zur Bewältigung des Unbekannten, befähigen. Im Unterschied dazu, stellen die Betrachtungen an dieser Stelle nicht auf die Fähigkeiten des Individuums, sondern vielmehr auf subjektunabhängige, übergeordnete Prinzipien ab.

Die Idee, biologische Gesetzmäßigkeiten auf den Bereich der Technik zu übertragen, ist nicht neu. Schon für DESSAUER (1933, S. 152) "scheint zwischen der Welt der Technik und dem Naturding das Verhältnis analog zu liegen" und er führt weiter aus, daß "die Entwicklungsgesetze, die äußeren der Anpassung ..., die inneren der Anlagenweitervererbung ... in Analogie zu Erfindungs-, deutlicher zu Konstruktionsgesetzen stehen" (vgl. auch bei STIEVE 1987, S. 163).

Ausgangspunkt bei RIEDL (1980, S. 7; vgl. auch S. 26 f.) ist die Überlegung, "daß jeder erfolgreiche Schritt der Anpassung einem Zuwachs an Information über jenes Milieu entspricht, das für sie [die Organismen] von Bedeutung ist"; Evolution wird in Anlehnung an Konrad Lorenz als ein "erkenntnisgewinnender Prozeß" bezeichnet.

Insofern könnte man auch das ingenieurwissenschaftliche Problem der Entwicklung neuer Systeme als erkenntnisgewinnenden Prozeß interpretieren, der das Ziel verfolgt, die Systeme so zu entwickeln, daß sie ihre Umwelt bzw. deren Gesetze abbilden. Und ebenso wie für den Erkenntnisprozeß des Lebendigen das Problem darin besteht, Urteile im voraus ('Vorurteile') zu fällen, was sich schon in der identischen Replikation der Gene äußert, da diese ein "Vorausurteil über die Gesetzmäßigkeiten, welchen die Nachfolge-Generation begegnen wird" (RIEDL 1980, S. 26; vgl. auch S. 32 bzw. S. 72), beinhaltet, geht es auch beim Prozeß ingenieurwissenschaftlichen Erkenntnisgewinns darum, Vorurteile (Hypothesen) zu fällen und diese der Prüfung der Realität (Empirie) auszusetzen.

RIEDL (1980) nennt in diesem Zusammenhang vier Hypothesen, mit welchen biologische Systeme im Rahmen ihres Erkenntnisgewinns operieren. "Das biologische Wissen enthält ein System vernünftiger Hypothesen, Voraus-Urteile, die uns im Rahmen dessen, wofür sie selektiert wurden, wie mit höchster Weisheit lenken; uns aber an dessen Grenzen vollkommen und niederträchtig in die Irre führen" (RIEDL 1980, S. 37). Diese vier Hypothesen des 'Lebendigen' werden im folgenden im Hinblick auf mögliche Analogien zum ingenieurwissenschaftlichen Erkenntnisgewinn kurz dargestellt.

Die **Hypothese vom Anscheinend Wahren** "enthält die Erwartung, daß sich manche gemachte Erfahrung unter entsprechenden Bedingungen wahrscheinlich prognostizieren, also durch Wiedereintreten bestätigen lassen werde" (RIEDL 1980, S. 53), oder anders ausgedrückt, daß bei einer Entscheidungsfindung keine andere Ausprägung der relevanten Bedingungen wahrscheinlicher ist, als Ausprägungen, die schon früher beobachtet wurden. Wichtig ist dabei, daß jegliche Erwartung an einer neuen Erfahrung gemessen und korrigiert wird. RIEDL (1980, S. 71) spricht davon, daß "der Zweck des Vor-Urteils ... in seiner Unentbehrlichkeit als Antrieb der Entscheidungsfindung [liegt]. Der Erfolg des Vor-Urteils ... aber auf Lernen und Erfahrung [beruht]".

Im Bereich der Ingenieurwissenschaften wird dieses Prinzip z. B. evident wenn, wie in Abschn. 4.1 angesprochen, bei Neuentwicklungen bereits gemachte Erfahrungen berücksichtigt werden. Auch wenn keine sicheren Aussagen über die Zukunft möglich sind, so gibt es doch oft keine andere Möglichkeit als sich am Vorangegangenen zu orientieren. BIRKHOFFER



(1985, S. 375) spricht davon, daß Analogien und Rückschlüsse von Bekanntem oft der einzige Weg zur Eigenschaftsprognose sind.

Gleichmaßen trifft jedoch auch in den Ingenieurwissenschaften die Einschränkung zu, daß "der Unsinn des Vorurteils überall dort zu erwarten [ist], wo das Urteil über den Bereich der Erfahrung, der es entwickelt hat, hinaus seine Extrapolationen versucht. Da nun beginnt der Unsinn der 'gelehrten' Moleküle, der 'gelehrten' Schaltungen und selbst der gelehrten Akademiker" (RIEDL 1980, S. 77) - durch einfache geometrische Vergrößerung von vorhandenen Systemen entstandene Probleme, wenn nicht sogar Katastrophen, die im Glauben erfolgte, dadurch die gleichen Sicherheiten zu erreichen (vgl. GORDON 1987, S. 95), sind ein gutes Beispiel für das Verlassen von 'Selektionsbereichen'.

Die **Hypothese vom Vergleichbaren** "enthält die Erwartung, daß das Ungleiche in der Wahrnehmung der Dinge ausgeglichen werden dürfe, und daß sich ähnliche Sachen, obwohl sie offenbar nicht dasselbe sind, auch in manchen noch nicht wahrgenommenen Eigenschaften als vergleichbar erweisen würden; sie läßt erwarten, daß Ähnliches die Voraussicht über weitere Ähnlichkeiten zuließe" (RIEDL 1980, S. 93). Anders ausgedrückt geht es um das Problem, ab wann zwei Systeme, die sich ähnlich sind, als gleich betrachtet werden können und um die Feststellung, welche Merkmale eines Systems miteinander koinzidieren.

In den Ingenieurwissenschaften ergeben sich beispielsweise solche Probleme, wenn es darum geht, empirische Beobachtungen zu interpretieren und Zusammenhänge zu erkennen, aus einer Fülle von Variablen die wesentlichen herauszukristallisieren oder, wenn bei Produktentwicklungen eine Berücksichtigung aller Einflußgrößen nicht möglich ist, eine sinnvolle Abstraktion vorzunehmen.

So sinnvoll und notwendig solche Abstraktionsprozesse im ingenieurwissenschaftlichen Bereich auch sind, so einschneidend können die Folgen derselben sein - die Folgen der einseitigen Funktions-, Technik- und Wachstumsorientierung innerhalb der Produktentwicklung der vergangenen 100 Jahre sind hierfür ein typisches Beispiel. Aber auch hier werden die Regulative der Selektion wohl nur für einen kurzen Zeitraum vom Menschen hintergangen werden können.

Die **Hypothese von der Ur-Sache** "enthält die Erwartung, daß ähnliche Ereignisse oder Zustände ähnliche Ereignis- oder Zustandsfolgen prognostizieren ließen", d. h., "daß ähnliche Ereignisse oder Zustände dieselben Ursachen haben und dieselbe Wirkung tun werden" (RIEDL 1980, S. 130). Während es bei der Hypothese vom Vergleichbaren um eine prinzipiell zeitgleiche Koinzidenz von Merkmalen geht, stellt diese Hypothese auf kausale Zusammenhänge zwischen aufeinanderfolgenden Merkmalen und deren Ausprägungen ab.

In den Ingenieurwissenschaften findet sich diese Hypothese beispielsweise darin wieder, daß bei Produktentwicklungen davon ausgegangen wird, daß ähnliche Systeme in der Realität dieselben Wirkungen entfalten werden oder daß bei Versuchen aus ähnlichen Beobachtungen auf dieselbe Ursache geschlossen wird.

Gefährlich wird dieses Ursache-Wirkungs-Denken dann, wenn das zumeist lineare Ursache-Wirkungs-Denken des Menschen der Komplexität und den vernetzten Zusammenhängen nicht mehr gerecht wird (vgl. dazu z. B. DÖRNER 1975).

Die **Hypothese vom Zweckvollen** "enthält die Erwartung, daß die Funktionen ähnlicher Systeme als Subfunktionen desselben Obersystems verstanden werden dürfen. Wir können auch sagen: daß gleiche Strukturen denselben Zwecken entsprechen oder genügen werden" (RIEDL 1980, S. 159). Dabei ist es wesentlich zu erwähnen, daß der Zweck jeglicher Struktur



aus den Zwecken übergeordneter Strukturen abgeleitet wird, und daß sich die Funktionen der Subsysteme an diesen Zwecken orientieren. Das bedeutet, daß nicht die Subsysteme Ursache für die Struktur von Supersystemen sind, sondern, daß die Zwecke des Ganzen die Struktur seiner Teile bedingen (vgl. dazu RIEDL 1980, S. 163 und WUKETITS 1988, S. 150).

Diesem wichtigen Grundsatz muß sich auch ingenieurwissenschaftliche Tätigkeit unterordnen. Ausgehend vom Primat eines zu erfüllenden Zweckes sind Strukturen, Substrukturen usw. zu entwickeln, die sich jeweils an den Zwecken der ihnen übergeordneten Stufe 'zu orientieren haben'. Entwicklungen, die als 'am Ziel vorbeigeschossen' oder auch mit dem Begriff 'over-engineering' charakterisiert werden, dürften bei einem solchen Vorgehen eigentlich nicht vorkommen.

Während jedoch in biologischen Systemen (abgesehen vom Menschen) der Zweck der Arterhaltung Ausgangspunkt der Zweckhierarchie war und ist, legt die Menschheit - unter vorübergehender Ausschaltung der Selektionskriterien der Natur - ihre Zwecke, die sie zu benötigen meint, selbst fest und richtet danach ihr Handeln aus. Aber auch hier läßt sich die Selektion nur vorübergehend 'einfrieren' und die Zukunft wird zeigen, ob die Zwecke der Menschheit mit dem Zweck der Arterhaltung in Einklang zu bringen sind.

## 5 Schlußgedanke

Intention der vorangegangenen Ausführungen war die Übertragung philosophischer, insbesondere erkenntnistheoretischer Fragestellungen und Ansätze auf den Bereich der Ingenieurwissenschaften, die in einer maßgeblichen Weise an der Gestaltung unserer Welt beteiligt sind und die für die Situation, in welcher sich die heutige Menschheit befindet, einen Großteil der Verantwortung tragen.

Wenn auch nur einige kleine Denkanstöße gegeben werden konnten, die zu einer Reflexion über die eigene Arbeit führen, die zu einer Besinnung auf grundlegende Erkenntnisprinzipien und Zielsetzungen veranlassen und die nicht zuletzt die immer mehr in den Hintergrund tretende Möglichkeit, einmal einen Tag ohne PC oder Meßgerät zu arbeiten, erkennen lassen, hat sich die Arbeit des Autors gelohnt.

Bei den Vertretern der Philosophie und Biologie sei an dieser Stelle Abbitte geleistet für die hoffentlich nicht allzu dilletantische Übernahme von Erkenntnissen dieser Wissenschaften durch einen Fachfremden.

Mit einem Zitat von KONRAD LORENZ (1988, S. 38), welches die Besonderheit des Menschen im Vergleich zur übrigen Natur hervorhebt, die aus der Sicht des Autors bisher jedoch noch nicht zu dessen Vorteil genutzt wurde, soll dieser Aufsatz abgeschlossen werden:

"Das Genom lernt nur aus seinen Erfolgen,  
der forschende Mensch aber auch aus seinen Irrtümern."

## Literaturverzeichnis

- BANSE, G. U. H. WENDT (1986): Erkenntnismethoden in den Technikwissenschaften. Berlin: VEB Verlag Technik 1986.
- BIRKHOFFER, H. (1985): Das Risiko eines Entwurfs. Anmerkungen zur Problematik der Eigenschaftsfrüherkennung. In: Proceedings of ICED 1985, S. 372 - 378. Zürich: Heurista Verlag 1985.
- BOHR, N. (1958): Atomphysik und menschliche Erkenntnis. Braunschweig: Vieweg Verlag 1958.
- DESSAUER, F. (1933): Philosophie der Technik. Bonn: Verlag Friedrich Cohen 1933.
- DÖRNER, D. (1975): Wie Menschen eine Welt verbessern wollten und sie dabei zerstörten. In: Bild der Wissenschaft 2 (1975), S. 48 - 53.
- GORDON, J. E. (1987): Strukturen unter Stress. Mechanische Belastbarkeit in Natur und Technik. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft 1987.
- HAIN, J. (1993): Rechneinsatz in der Konstruktion - eine kritische Betrachtung. In: Der Konstrukteur 4 (1993), S. 62.
- HEISENBERG, W. (1984): Physik und Philosophie. Frankfurt a. M., Berlin u. Wien: Ullstein Verlag 1984.
- KANT, I. (1982): Kritik der reinen Vernunft. 6. Aufl. Herausgegeben von W. Weischedel. Wiesbaden: Suhrkamp Verlag 1982.
- LORENZ, K. (1943): Die angeborenen Formen möglicher Erfahrung. Zeitschrift für Tierpsychologie 5 (1943), S. 235 - 409.
- LORENZ, K. (1988): Die Rückseite des Spiegels. Der Abbau des Menschlichen. Sammelausgabe. München u. Zürich: Piper Verlag 1988.
- POPPER, K. (1973): Objektive Erkenntnis. Ein evolutionärer Entwurf. Hamburg: Hoffmann und Campe Verlag 1973.
- POPPER, K. (1984): Logik der Forschung. 8. Aufl. Tübingen: J. C. B. Mohr (Paul Siebeck) 1984.
- RIEDL, R. (1980): Biologie der Erkenntnis. Die stammesgeschichtlichen Grundlagen der Vernunft. 2. Aufl. Berlin u. Hamburg: Verlag Paul Parey 1980.
- RODENACKER, W. (1988): Konstruktionsmethodik und Erkenntnisse der Biologie. In: Proceedings of ICED 1988, S. 277 - 285. Zürich: Heurista Verlag 1988.

- RODENACKER, W. (1990): Gemeinsamkeiten der Konstruktionsmethoden. In: Festschrift G. Pahl, S. 253 - 265. Darmstadt: TH Darmstadt 1990.
- STIEVE, H. (1987): Evolutionsprognose aus der Sicht eines Biologen. In: RWTH Aachen (Hrsg.): Evolution und Prognose. Beiträge des ersten interdisziplinären Kolloquiums der RWTH Aachen, S. 157 -167. Aachen: RWTH Aachen 1987.
- VOLLMER, G. (1987): Evolutionäre Erkenntnistheorie. 4. Aufl., Stuttgart: S. Hirzel Verlag 1987.
- WEIZSÄCKER, C. F. v. (1970): Zum Weltbild der Physik. Stuttgart: S. Hirzel Verlag 1970.
- WUKETITS, F. M. (1988): Evolutionstheorie. Historische Voraussetzungen, Positionen, Kritik. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1988.



# Instrumente des Kostenmanagements

von Peter Fabrig

## 1 Einleitung

In den letzten Jahren entwickelten sich in den Unternehmensbereichen Forschung und Entwicklung, Konstruktion und Rechnungswesen viele Begriffe und Schlagwörter, die zum Teil großes Unbehagen verursachten, wenn nicht sogar für Verwirrung sorgten. Ist z. B. ein Simultaneous Engineering das gleiche wie Concurrent Engineering, entspricht Activity Based Cost einer Prozeßkostenrechnung, ist Target Costing einer Wertanalyse überlegen oder füllt man am Ende nicht wieder den alten Wein in neue Schläuche?

Ziel dieses Beitrages in diesem Rahmen kann es nicht sein, alle Begriffe zu klären, zu definieren und gegenüberzustellen. Vielmehr soll auf gemeinsame Ziele der Methoden und Verfahren und auf Problembereiche bei Anwendung einiger Methoden näher eingegangen werden.

Letztendlich hängt der wirtschaftliche Erfolg eines Unternehmens von der Marktakzeptanz seiner Produkte ab, d. h. daß jedes Unternehmen gezwungen sein wird, die Anforderungen der Kunden möglichst schnell, kostenorientiert und konsequent umzusetzen (vgl. HORVÁTH/NIEMAND/WOLBOLD 1993, S. 26).

Da neben den Herstellkosten auch die Entwicklungs- und Konstruktionskosten die Selbstkosten eines Produktes beeinflussen, soll im folgenden Kapitel auf die Berücksichtigung der Entwicklungs- und Konstruktionskosten beim kostengünstigen Konstruieren eingegangen werden. Daraus wird die Notwendigkeit einer Beurteilung von Konstruktionstätigkeiten abgeleitet und im dritten Kapitel die Problematik der Messung der Leistung einer Konstruktionstätigkeit behandelt. Abschließend wird versucht, diese behandelten Teilbereiche wieder in ein gemeinsames Konzept zu integrieren.

## 2 Berücksichtigung der Konstruktionskosten beim kostengünstigen Konstruieren

### 2.1 Rechtfertigung der Berücksichtigung der Konstruktionskosten

Die Konstruktionskosten, d. h. die durch die Konstruktionsabteilung verursachten Kosten, wurden lange Zeit nachrangig behandelt, da sie im Maschinenbau im Schnitt nur 6% (EHRENSPIEL 1985, S. 72) bis 10% (BREIING, FLEMMING 1993, S. 90) der Selbstkosten betragen und zum Teil in einem großen "Gemeinkostentopf" enthalten und somit nicht transparent sind. Da jedoch dieser Anteil bei einmaligen Sonderkonstruktionen auf bis zu 30% der Selbstkosten steigen kann (EHRENSPIEL 1985, S. 72) und der Preis für den Produktionsfaktor Arbeit, der innerhalb der Konstruktion den größten Anteil ausmacht und weiterhin auch ausmachen wird, nach BROCKHOFF (1992, S. 15) in den letzten Jahren im Vergleich zu ande-

ren Produktionsfaktoren überproportional anstieg -dieser Trend wird sich wahrscheinlich auch in Zukunft fortsetzen-, ist es notwendig, die Konstruktionskosten stärker als bisher in die Überlegungen zum kostengünstigen Konstruieren miteinzubeziehen.

Weiterhin sollte beim kostengünstigen Konstruieren überprüft werden, unter welchen Voraussetzungen sich zusätzliche Maßnahmen zur Senkung der Herstellkosten lohnen. Da solche Maßnahmen in der Regel einer Erhöhung der Konstruktionskosten entsprechen, kann man das Verhältnis von Nutzen (Senkung der Herstellkosten) und Aufwand (Erhöhung der Konstruktionskosten) als Maß der Wirtschaftlichkeit von zusätzlichen Maßnahmen zum kostengünstigen Konstruieren verwenden (s. KIEWERT 1988, S. 301).

Diese Überlegungen sollten verdeutlichen, daß die Konstruktionskosten und deren Auswirkungen auf die Selbstkosten nicht vernachlässigt werden dürfen, vor allem wenn man bedenkt, daß eine Reduzierung der Konstruktionskosten durch eine Verkürzung der Konstruktionszeit evtl. sogar zu einer Erhöhung der Selbstkosten führen kann. Dieser Grenzbereich wird dann erreicht, wenn durch den erhöhten Zeitdruck Maßnahmen zum kostengünstigen Konstruieren nicht oder nur zu einem geringen Anteil angewandt werden können und dadurch die Herstellkosten überproportional ansteigen.

## 2.2 Bisherige Berücksichtigung der Konstruktionskosten

Die Veränderungen der Konstruktionskosten können -wie bereits im Abschnitt 2.1 erwähnt- im Verhältnis zu den dadurch möglichen bzw. nötigen Änderungen der Herstellkosten betrachtet werden. Sind die Abhängigkeiten der Herstellkosten und der Konstruktionskosten von der Veränderung der Konstruktionszeit bekannt, kann nach einer mathematischen Herleitung ermittelt werden, "um welchen Faktor ... die Konstruktionskosten erhöht bzw. die Konstruktionszeit verlängert werden muß, um das Minimum an HK2 [Herstellkosten] zu erhalten" (KIEWERT 1988, S. 304). KIEWERT (1988) erarbeitete mehrere Diagramme zur Bestimmung einer optimalen Konstruktionszeitänderung für verschiedene Konstruktionskostenanteile an den Selbstkosten und für verschiedene Kostensenkungspotentiale.

Aber auch nach der Bestimmung einer "optimalen" Konstruktionszeitverlängerung stellt sich dem verantwortlichen Konstrukteur die Frage, wie er diese zusätzliche Konstruktionszeit bezüglich der einzelnen Konstruktionsphasen einsetzt, um auch die erwartete überproportionale Senkung der Herstellkosten und somit eine Senkung der Selbstkosten zu erreichen (diese Frage stellt sich allerdings bei jeder Konstruktion bezüglich der zur Verfügung stehenden Konstruktionszeit).

Die beiden möglichen Extreme und deren Nachteile sollen im folgenden beispielhaft aufgezeigt werden:

- a) Die gesamte Konstruktionszeit wird zum gleichen Anteil wie bisher auf die einzelnen Konstruktionsphasen verteilt, wobei Maßnahmen zum kostengünstigen Konstruieren im Anteil der ermittelten Konstruktionszeitverlängerung angewandt werden:  
Bei dieser Vorgehensweise besteht die Gefahr, daß in frühen Phasen des Konstruktionsprozesses prozentual mehr Konstruktionszeit und somit Konstruktionskosten anfallen als Herstellkosten gesenkt werden können. Am Ende des Konstruktionsprozesses steht dann

zuwenig Zeit zur Verfügung, um das Herstellkostensenkungspotential durch Anwendung geeigneter Maßnahmen möglichst optimal auszuschöpfen.

- b) Die ermittelte Konstruktionszeitverlängerung wird dazu verwendet, nach einem zeitlich wie bisher durchgeführten Konstruktionsprozeß nachträgliche Maßnahmen zur Herstellkostenreduzierung anzuwenden (z. B. Anwendung einer Wertanalyse):  
Bei dieser Vorgehensweise können nachträgliche Maßnahmen unter Umständen zusätzliche Kosten verursachen, oder sie werden gar nicht mehr durchgeführt, da das Produkt schon "fertig" konstruiert wurde.

In der Regel wird eine Mischform beider Vorgehensweisen zur Anwendung kommen. Allen ist jedoch gleich, daß trotz einer angenommen möglichen ex-ante Bestimmung der optimalen Konstruktionszeit die erzielte Selbstkostensenkung erst ex-post möglich ist. Dadurch kann erst zu spät festgestellt werden, daß die getroffenen Annahmen über die Zusammenhänge zwischen Verlängerung der Konstruktionszeit und Herstellkosten bzw. zwischen Verlängerung der Konstruktionszeit und Konstruktionskosten nicht zutrafen und das eigentliche Ziel, eine Selbstkostensenkung, nicht erreicht wurde.

Auch KIEWERT (1988, S. 307) räumt bei seinen Ausführungen ein, daß die Bestimmung einer optimalen Verlängerung der Konstruktionszeit eher eine Hilfe für die Konstruktionsabteilung gegenüber der Unternehmensleitung zur Begründung einer ausreichenden Konstruktionszeit darstellt.

Im folgenden Abschnitt soll zum einen geklärt werden, ob es mögliche Wege gibt, die es den am Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß beteiligten Personen erleichtern könnten, möglichst genau die zur Selbstkostenoptimierung erforderliche Konstruktionszeit für die einzelnen Konstruktionsphasen zu planen und bei Fehlentwicklungen frühzeitig korrigierend einzugreifen. Zum anderen sollen die Voraussetzungen aufgezeigt werden, die geschaffen werden müssen, um solche Wege beschreiten zu können.

### 2.3 Neuere Ansätze zur Berücksichtigung der Konstruktionskosten

Im vorangegangenen Abschnitt wurde dargestellt, daß ein Zusammenhang zwischen der Konstruktionszeit und den Herstellkosten bzw. den Konstruktionskosten besteht und daraus ableitbar eine Bestimmung einer -zumindest rechnerisch- optimalen Konstruktionszeit zur Selbstkostenminimierung möglich ist.

Um jedoch eine bestimmte Konstruktionszeitverlängerung auch optimal einsetzen zu können, Abweichungen bzgl. einer Selbstkostenoptimierung während des Konstruktionsprozesses transparent zu machen und dann noch korrigierend einzugreifen, müßten folgende Daten, Informationen und Zusammenhänge aufbereitet und erarbeitet werden:

- Der Zusammenhang zwischen einer Konstruktionszeitverlängerung in den einzelnen Konstruktionsphasen und den dadurch möglichen Senkungen der Herstellkosten.  
Als Frage formuliert:  
Um wieviel Prozent kann ich die Herstellkosten eines zu konstruierenden Produktes senken, wenn ich die Zeit nur für das Konzipieren (Konzeptphase) verdopple?

- Der Zusammenhang zwischen der Konstruktionszeit bzw. einer Konstruktionszeitverlängerung in den einzelnen Phasen und dem Leistungsmengen-Output (Arbeitsergebnis in Mengen, Qualität) einer einzelnen Konstruktionsphase.  
Als Frage formuliert:  
Welchen Leistungsmengen-Output (welches Arbeitsergebnis) muß ich erreichen, wenn ich die Konstruktionszeit für das Konzipieren fest vorgebe bzw. verdoppele?
- Zur Erarbeitung des eben genannten Zusammenhangs müssen zunächst Kennzahlen zur Messung des Leistungsmengen-Outputs innerhalb der Konstruktion allgemein und speziell innerhalb der einzelnen Konstruktionsphasen bestimmt werden.

Bereits beim Formulieren der noch zu erarbeitenden Zusammenhänge werden die auftretenden Probleme klar. Fraglich bleibt, ob die genannten Daten und Zusammenhänge überhaupt, und wenn in ausreichender Güte und Sicherheit bestimmt werden können. Schon der Versuch, einen Zusammenhang zwischen den Konstruktionszeiten in den einzelnen Konstruktionsphasen und den Herstellkosten herzustellen, bereitet einiges Kopfzerbrechen, wenn man bedenkt, daß die Bestimmung der Herstellkosten umso unpräziser wird je früher man sich im Konstruktionsprozeß befindet.

Zwar gibt EHRENSPIEL (1985, S. 78) an, daß gerade das Konzept einen großen Einfluß auf die Herstellkosten hat, der genauere quantitative Zusammenhang zwischen einer Verlängerung der Konstruktionszeit in der Konzeptphase und einer Herstellkostenverringerung könnte jedoch erst nach einer umfangreicheren Auswertung von durchgeführten Herstellkostensenkungen durch Änderungen des Funktionsprinzips (in der Konzeptphase) ermittelt werden.

Ein weiteres Problem liegt darin, daß die einzelnen Konstruktionsphasen und deren Auswirkungen auf die Herstellkosten oft nicht scharf genug voneinander getrennt werden können. Das Klären der Aufgabenstellung kann z. B. wesentlich zu einer kostengünstigen Lösung beitragen. Da diese Auswirkungen jedoch in diesem frühen Stadium kaum quantifiziert werden können, wird eine erreichbare Herstellkostensenkung möglicherweise späteren Konstruktionsphasen zugeordnet.

Diese Ausführungen sollen hier genügen, um auf die Probleme bei der Bestimmung von einem optimalen Verhältnis von Konstruktionszeitveränderung und Herstellkostenveränderung hinzuweisen.

Auf die besondere Problematik, die oben genannte Messung des Leistungsmengen-Outputs von Konstruktionstätigkeiten und speziell von einzelnen Konstruktionsphasen, soll im nächsten Kapitel kurz eingegangen werden.

### **3 Die Problematik der Leistungsmessung in der Konstruktion**

Vorab soll dem Leser verdeutlicht werden, daß es bei der Untersuchung von Kennzahlen zur Messung des Leistungsmengen-Outputs von Konstruktionstätigkeiten nicht vorrangig darum geht, die eigene Konstruktionsabteilung (und vor allem keine einzelnen Personen) auf ihre Ef-



fizienz zu überprüfen, sondern es soll vielmehr dazu beigetragen werden, im Rahmen von Kostenmanagementinstrumenten möglichst in frühen Phasen der Produktgestaltung korrigierend eingreifen zu können.

Wenn man bedenkt, daß viele Konstrukteure "die Planung als Tod der Kreativität" (BROCKHOFF 1992, S.11) bezeichnen, kann man verstehen, daß allein die Behandlung dieser Thematik -vor allem da zur Planung noch Kontrolle und Steuerung der Konstruktionstätigkeiten hinzukommen sollen- problematisch ist.

Im folgenden sollen zunächst einige aus der Literatur entnommene Kennzahlen zur Leistungsmessung von Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten, die die Konstruktionstätigkeiten einschließen, aufgezeigt werden. Dabei stellt man fest, daß eine Behandlung dieser Thematik meist von der Seite der Betriebswirtschaftslehre vorgenommen wird. Dies scheint nicht verwunderlich, da die oben erwähnte Planung, Kontrolle und Steuerung von Projekten in der Regel zu den Teilaufgaben des Controllings im Unternehmen gehören. Auch im Rechnungswesen sind die Begriffe der Kennzahlen vorhanden, z. B. in der Prozeßkostenrechnung als "Standards of Performance" (DEYHLE 1991, S. 87).

RIEDL (1990) schlägt eine Maßzahl vor, in welche die effektiv geleisteten Mengen eines Arbeitsergebnisses in geeigneter Dimension eingehen (RIEDL 1990, S. 34). Speziell für den Bereich der Soft- und Hardwareentwicklung gibt er Beispiele an. Demnach können u. a. Netto-Lines of Code, Anzahl der Programmverzweigungen, dokumentierter Text und Grafik in DIN A4 Seiten oder freigegebene Prüfunterlagen als Kennzahlen zur Beurteilung der Leistung von Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten herangezogen werden.

Nach BROCKHOFF (1992, S. 219 f.) könnten die Outputeinheiten von Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten nach Anzahl der Software-Zeilen, Anzahl der DIN-Seiten Konstruktionszeichnungen, Anzahl der Ergebnisberichte je Periode, der Relativ-Output im Vergleich zu Standardaufgaben, Anzahl der Veröffentlichungen (ggf. gewichtet mit dem Ansehen der Zeitschrift) oder Anzahl der Patente gemessen werden.

Die in PAHL/BEITZ (1993, S. 65) beschriebenen Beispiele für die Informationsausgabe bei einem Lösungsprozeß wie Skizzen, Zeichnungen, Tabellen, Versuchsberichte, Montage- und Betriebsanleitungen, Berechnungsunterlagen, Bestellungen und Arbeitspläne könnten ebenfalls als Kennzahlen zur Leistungsmessung herangezogen werden, wenn diese selbst hinsichtlich verschiedener Kriterien wie Aussagesicherheit, Informationsschärfe usw. beurteilt würden.

Bei der Betrachtung dieser Kennzahlen und dem Versuch der Übertragung derselben speziell auf den Bereich der Konstruktion erkennt man, daß diese quantitativen Kennzahlen meist keine Aussage über die Qualität des Leistungsmengen-Output machen. Es ist durchaus denkbar, daß eine Dokumentation mit weniger DIN A4 Seiten, welche aber dafür umso strukturierter und klarer ist, höher zu bewerten ist als eine nicht überschaubare Anzahl von Ordnern oder Büchern mit zum Teil redundanten Informationen. Daher ist es sinnvoll, die Output-Größen wie bei PAHL/ BEITZ (1993) selbst einer Beurteilung zu unterziehen.

Eine weitere Einschränkung der Anwendbarkeit der genannten Kennzahlen besteht darin, daß eine Kennzahl für sich allein meist nicht aussagefähig ist, d. h. die ermittelte Istgröße muß erst einem vorgegebenen Sollwert oder einem aus der Vergangenheit ermittelten Vergleichswert

gegenübergestellt werden (s. dazu auch EHRENSPIEL 1985, S. 72). Auch RIEDL (1990, S. 173) spricht davon, daß eine systematisch aufgebaute Erfahrungsdatenbank Basis für die Ermittlung von Meß- und Kennzahlen ist, wobei der Aufbau einer solchen Datenbank mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden sein kann (vgl. RIEDL 1990, S. 201).

Im Rahmen dieses Beitrages kann nicht auf die gesamte Problematik bei der Festlegung von Leistungskennzahlen im Forschungs-, Entwicklungs- und Konstruktionsbereich eingegangen werden, sondern nur auf einige Problembereiche und grundlegende Aspekte hingewiesen werden. Dies entbindet aber nicht von der Notwendigkeit, sich mit diesem Themengebiet auch im Hinblick auf die Konstruktionskosten (vgl. Kapitel 2) in Zukunft intensiver auseinanderzusetzen. In weiteren Arbeiten sollen folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Sind bereits bekannte Kennzahlen oder Kennzahlensysteme zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit auch auf Konstruktionstätigkeiten anwendbar?
- Kann man speziell für den Konstruktionsbereich neue und geeignetere Kennzahlen ermitteln?
- Unter welchen Voraussetzungen sind solche Kennzahlen und Kennzahlensysteme anwendbar?

## 4 Schlußbetrachtung

In den beiden vorangegangenen Kapiteln wurden kurz zwei Teilbereiche angesprochen, die Mosaiksteine des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses bilden. Integriert in den gesamten Produktentstehungsprozeß können die genannten Methoden unter Berücksichtigung der erwähnten auftretenden Probleme einen Beitrag dazu leisten, dem in Kapitel 1 genannten Ziel eines jeden Unternehmens, die Kundenwünsche im Zielmarkt konsequent und insbesondere kostenorientiert umzusetzen, ein Stück näher zu kommen.

Neben anderen Methoden wie der Wertanalyse sind die erwähnten Methoden somit Bestandteil von Instrumenten des Kostenmanagements. Die Verbindung von Elementen bestehender Instrumente des Kostenmanagements mit der Notwendigkeit, das gesamte Unternehmen auf die Anforderungen des Marktes auszurichten, nennt man auch "Target Costing" (HORVÁTH/NIEMAND/WOBOLD 1993, S. 3), das von den gleichen Autoren weiterhin als ein "Bündel von Kostenplanungs-, Kostenkontroll- und Kostenmanagementinstrumenten, die schon in den frühen Phasen der Produkt- und Prozeßgestaltung zum Einsatz kommen, um die Kostenstrukturen frühzeitig im Hinblick auf die Marktanforderungen gestalten zu können" (HORVÁTH/NIEMAND/WOBOLD 1993, S. 27), definiert wird. Hier enden die Ausführungen wieder in einem Schlagwort, das den Leser jedoch nicht verwirren sondern nur aufzeigen soll, daß viele Ansätze nicht vollkommen neu sind, sondern manchmal in modifizierter oder integrierter Form in verschiedenen Begriffen vorkommen.

## Literaturverzeichnis

- BREIING, A; FLEMMING, M. (1993):  
Theorie und Methoden des Konstruierens.  
Berlin u. a. : Springer, 1993.
- BROCKHOFF, K. (1992):  
Forschung und Entwicklung.-Planung und Kontrolle.  
3., überarb. u. erw. Aufl.-  
München; Wien: Oldenbourg, 1992.
- DEYHLE, A. (1991):  
Strukturkostenanalyse.  
In: Andreas, D. F. W.: Kosten-Controlling & Arbeitsvereinfachung, S. 87-102,  
Gauting, München: Management Service, 1991.
- EHRENSPIEL, K. (1985):  
Kostengünstig Konstruieren.  
Berlin u. a. : Springer, 1985.
- HORVÁTH, P.; NIEMAND, S.; WOLBOLD, M. (1993):  
Target Costing-State of the Art.  
In: Horváth, P. (Hrsg): Target Costing. S. 1-27,  
Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993.
- KIEWERT, A. (1988):  
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zum kostengünstigen Konstruieren.  
Konstruktion 40 (1988), S. 301-307,
- PAHL, G.; BEITZ, W.:  
Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung.  
3., neubearb. u. erw. Auflage.-  
Berlin u. a. : Springer. 1993.
- RIEDL, J. E.:  
Projekt-Controlling in Forschung und Entwicklung.  
Berlin u. a.: Springer, 1990.



# Ein Diskussionsbeitrag zur Normung der Wellenberechnung

von Ulrich Oldendorf

The careful text-books measure  
(Let all who build beware!)  
The load, the shock, the pressure  
Material can bear.  
So when the buckled girder  
Lets down the grinding span,  
The blame of loss or murder,  
Is laid upon the man,  
Not on the stuff - the Man!

Rudyard Kipling,  
*Hymn of Breaking Strain*

## 1 Einleitung

Die momentan angestrebte Normung einer Wellenberechnung stellt sicherlich ein sinnvolles und - gerade im Hinblick auf internationale Normungsbestrebungen - notwendiges Vorhaben dar. Fast ist man erstaunt, daß für ein so grundlegendes Maschinenelement wie die Welle eine einheitliche Berechnungsvorschrift fehlt. Welche Anforderungen sind nun an die zu erarbeitende Norm zu stellen?

Die Normung ist nur sinnvoll, wenn die daraus hervorgehenden Ergebnisse in der Praxis eine große Akzeptanz finden und dadurch eine breite Anwendung erfolgt. Realitätsferne Vorgaben, die dazu führen, daß nur auf Verlangen von Kunden oder Abnahmegesellschaften die Norm zur Anwendung kommt, während intern mit eigenen Ansätzen gearbeitet wird, sind sicherlich unbefriedigend. Damit eng verbunden ist die verwendete Begriffswelt, die klar und verständlich sein muß. Dabei besteht natürlich das Problem, daß neuere Vorgehensweisen, die ein größeres Umdenken im Vorgehen und damit den Begriffen notwendig machen würden, trotz technischer Überlegenheit eventuell nicht zur Anwendung kommen.

Weiterhin muß der Berechnungsgang für alle technisch relevanten Ausführungen von Geometrie, Werkstoff und Belastung einen einheitlichen und umfassenden Lösungsweg bieten. Dies führt im Fall der Wellenberechnung unmittelbar zur Frage, ob alle Welle-Nabe-Verbindungen, die ja im Regelfall Auswirkungen auf die Festigkeit der Welle haben, zumindest im Hinblick auf die Welle Bestandteil der Norm sein sollen. Solche Forderungen wurden bereits im Vorfeld erhoben (LINKE 1994). Zusammenfassend läßt sich an Forderungen festhalten:

- einheitliche Behandlung aller technisch relevanten Ausführungen
- allgemein akzeptierte Vorgehensweise

Betrachtet man einerseits am Beispiel von Getriebewellen die Gestaltungsvielfalt und verfolgt auf der anderen Seite in internationalen Zeitschriften die Diskussion um den richtigen Weg eines Betriebsfestigkeitsnachweises, wird die Größenordnung der gestellten Aufgabe klar. In den folgenden Kapiteln wird auf diese Problembereiche näher eingegangen, indem zunächst die Besonderheiten einer Welle in bezug auf Geometrie, Belastung und Schädigung

gungsmechanismen dargestellt werden. Danach erfolgt eine Vorstellung und Diskussion möglicher Konzepte zur Lebensdauerabschätzung, die speziell auf die zuvor dargestellten Charakteristika von Wellen abgestimmt ist.

## 2 Besonderheiten des Maschinenelementes Welle

### 2.1 Mehrfachkerbwirkung

Aus der Sicht der Festigkeitsberechnung sind Wellen häufig eine Ansammlung von Mehrfachkerben. Paßfedernuten werden in Wellenabsätze eingefräst, Sicherungsringnuten in Vielkeilwellen eingedreht, Gewinde für Wellenmuttern - selbst noch durch Einfräsungen unterbrochen - wird durch Freistiche abgegrenzt; die Aufzählung ließe sich beliebig erweitern. Im Hinblick auf die Berechnungsnormung wären Mehrfachkerben wohl beherrschbar. So wie zum Beispiel für Wellenabsätze Tabellenwerke vorliegen, die über Formzahlen die Kerbwirkung beschreiben, könnte man ebenso für die technisch relevanten Mehrfachkerben Formzahlen ermitteln bzw. hat dies teilweise bereits getan (PERSEKE 1984). Diese prinzipielle Möglichkeit sagt jedoch nichts über den im Sinne einer umfassenden Behandlung nötigen Aufwand aus.

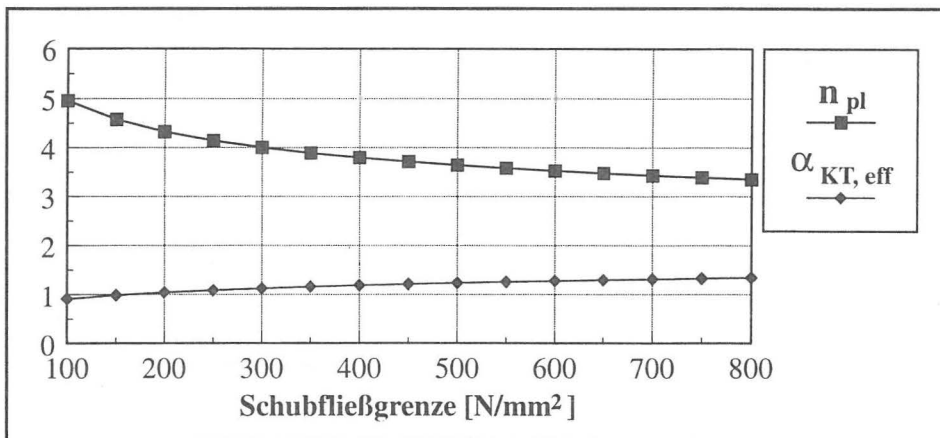
### 2.2 Lasteinleitung

Neben der Mehrfachkerbwirkung ist auch die Lasteinleitung zu beachten. Das in Lehrbüchern der Technischen Mechanik in den einleitenden Kapiteln als Voraussetzung für die darin hergeleiteten Formeln zur Wellenberechnung oft dargestellte Saint-Venant'sche Prinzip ist am realen Bauteil meist nicht gegeben. Selten ist ein "beruhigter" Bereich vorhanden, Kraftein- und -ableitungszonen liegen nicht nur eng beieinander, sondern sind oft selbst wieder Kerbstellen. Beispielsweise stützt sich der Sicherungsring bei axialer Belastung an der Nutwand ab und leitet so unmittelbar an der Kerbstelle Kräfte in die Welle ein. Gleiches gilt für andere formschlüssige Komponenten, aber auch für einen Querpreßverband, dessen Passung durch einen Wellenabsatz abgesetzt ist.

Bei der Berechnung wird jedoch oft die Formzahl der lastfreien Kerbe verwendet und mit Nennspannungsverteilungen gerechnet, die explizit für Bereiche in ausreichender Entfernung zu Lasteinleitungsstellen abgeleitet wurden. Die Notwendigkeit zur Überprüfung solcher Problemstellen wird oft dadurch verringert, daß ein Abbau der dort zu vermutenden lokalen Spannungsspitzen durch Plastifizierung erlaubt wird. Diese statische Stützwirkung für eine Mehrfachkerbe mit Lasteinleitung zu quantifizieren, ist jedoch nicht unproblematisch.

Beispielsweise sollte im Rahmen des Normentwurfs zur Paßfederberechnung für statische Belastung die durch Fließen hervorgerufene, scheinbare Erhöhung der Fließgrenze festgelegt werden (THEIBEN 1994). Läßt man spröde Werkstoffe außer acht, für die diese Überlegungen ohnehin nicht anwendbar sind, stellt sich bei einsatzgehärteten Bauteilen die Frage, ob nicht - obwohl meist an der Oberfläche die maximalen Spannungen auftreten - trotzdem das weniger feste Kerngefüge früher plastifiziert. Schadensfälle dieser Art, bei denen die härteste Einsatzschicht vom fließenden Kern abgetrennt wird, sind aus der Praxis durchaus bekannt.

Weiterhin ist in diesen Fällen unklar, wie weit die plastifizierten Bereiche des Bauteils ausgeht sind.



**Bild 1:** Statische Stützwirkung durch Fließen nach VDI 2226

Die auch in anderen Standardwerken (DUBBEL S. 266, NIEMANN S. 62) zu findenden Ansätze der VDI-Richtlinie 2226 (VDI-RICHTLINIE 1965) führen zu beachtlichen Fließgrenzenenerhöhungen bzw. stark verringerten effektiven Kerbformzahlen. In Bild 1 ist für eine Kerbe mit einer Formzahl von 4,5, wie sie an einer Paßfedernut anzutreffen ist, sowohl die Stützwirkung durch Plastifizierung ( $n_{pl}$ ) als auch die daraus resultierende, effektive Kerbformzahl ( $\alpha_{KT, eff}$ ) aufgetragen. Für Werkstoffe mit niedrigen Fließgrenzen kommt es formelmäßig sogar zu einer Überkompensation der Kerbe ( $\alpha_{KT, eff} < 1$ ), was physikalisch schwer begründbar ist und im Text der Richtlinie auch ausgeschlossen wird (VDI-RICHTLINIE 1965, S. 9).

Völlig vernachlässigt wurde bei dem bisher Gesagten, daß im Regelfall das Fließen durch einen dreidimensionalen Spannungszustand hervorgerufen wird. Damit verbundene Fragestellungen, wie die Bildung einer geeigneten Vergleichsspannung oder die Berücksichtigung fließbegünstigender bzw. -behindernder Spannungszustände, stellen weitere Probleme dar.

### 2.3 Schwingungverschleiß

Die bisherigen Ausführungen zeigen schon einige Schwierigkeiten einer allgemeingültigen Formulierung einer Wellenberechnung selbst bei nur statischer Belastung auf. Zur Klärung der bisher genannten Fragen wäre es allerdings immer noch möglich, die Welle allein zu betrachten. Die Krafteinleitung durch andere Bauteile müßte dabei durch geeignete Wahl von Lastverteilungsannahmen abgebildet werden.

Ist die Belastung jedoch zeitlich veränderlich - was den in der Praxis vorherrschenden Fall darstellt - potenzieren sich die Probleme. Dabei ist nicht an eher allgemeine Fragen wie zyklische Ver- oder Entfestigung der Werkstoffe, Phasenlagen- und Reihenfolgeeinflüsse der Lasten oder Größen- und Oberflächeneinflüsse gedacht, sondern daran, daß eine isolierte Betrachtung der Welle häufig nicht mehr möglich ist. Typischerweise steht eine Welle mit anderen Bauteilen in Wechselwirkung. Dies gilt für alle Welle-Nabe-Verbindungen, aber zum Beispiel auch für Sicherungsringe oder Lager. Dabei kann es unter zyklischer Belastung zu Schlupfbewegungen der beteiligten Bauteile kommen, was bei gleichzeitigem Vorliegen einer

Flächenpressung in den oszillierenden Bereichen die Voraussetzung für Schwingungsverschleiß darstellt.

Daß dies für Paßfederverbindungen den wesentlichen Schädigungsparameter darstellt, haben mehrere Dissertationen am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik gezeigt (ZANG 1987, WEIGAND 1991, RENNEISEN 1993). Wichtigste Erkenntnis ist dabei, daß für Aussagen über die Lebensdauer immer die gesamte Verbindung betrachtet werden muß und es nicht zulässig ist, an Stelle beispielsweise einer Paßfederverbindung nur eine genutete Welle zu betrachten. Diese Einschätzung bestätigt sich auch bei anderen formschlüssigen Verbindungen wie Polygonverbindungen (GÖTTLICHER 1994) oder Zahnwellenverbindungen (DIETZ 1993), wobei auch hier dem Schwingungsverschleiß eine wesentliche Rolle zufällt.

## 2.4 Zusammenfassung

Stellt man die oben erläuterten Charakteristika des Systems Welle noch einmal zusammen, läßt sich festhalten:

- die Welle ist geprägt von Mehrfachkerben
- es gibt oft keinen ungestörten Bereich in ausreichender Entfernung von Lasteinleitungsstellen
- Lastein- und -ableitungen erfolgen häufig über Kerbstellen
- bei zyklischer Belastung und Wechselwirkung mit anderen Bauteilen kann an der Welle Schwingungsverschleiß auftreten

Für jeden einzelnen der obigen Punkte lassen sich natürlich auch andere Maschinenelemente finden, die ähnliche Probleme aufweisen; in der Summe stellt dies jedoch eine Besonderheit von Wellen dar. Im folgenden wird dargestellt, welche aktuell diskutierten Ansätze zur Lebensdauerabschätzung für diese Besonderheiten geeignet sind.

## 3 Konzepte der Lebensdauerabschätzung

### 3.1 Voraussetzungen

Für die bisher geschilderten Probleme kann sicher angenommen werden, daß der statische Fall beherrschbar ist. Der Aufwand mag zwar im einzelnen groß sein, doch ist zum Beispiel durch eine elastisch-plastische FEM-Rechnung auch eine plastifizierende Mehrfachkerbe mit Kräfteinleitung abbildbar. Wie zuvor schon für die Belastungen erläutert, werden die Verhältnisse bei dynamischer Belastung wesentlich komplexer, was auch die Anforderungen an Berechnungsansätze ansteigen läßt.

Auf die allgemeinen Probleme einer Lebensdauerabschätzung, wie sie jedem Verfahren eigen sind - Schadensakkumulation, Modellvorstellungen für Werkstoffermüdung, Bildung von Lastkollektiven etc. - soll hier nicht eingegangen werden, wobei diese Fragestellungen nach wie vor als nicht umfassend geklärt gelten müssen. Es soll lediglich auf die sich aus den Besonderheiten einer Welle (vgl. 2.4) und den unter 1 genannten Anforderungen, die eine Berechnungsform stellt, ergebenden Fragen eingegangen werden. Dementsprechend kurz ist die folgende Darstellung der verschiedenen Ansätze gehalten.



### 3.2 Ansätze

Für die Lebensdauerabschätzung stehen drei, mit gewissen Einschränkungen vier Konzepte zur Verfügung:

- das Nennspannungskonzept, bei dem einer - eventuell auch synthetischen - Bauteilwöhlerlinie ein Nennspannungskollektiv gegenübergestellt wird. Beschränkt man sich auf einstufige Belastungen, kann auch eine Auslegung nach Smith- oder Haigh-Schaubildern mit Aufteilung der Lasten in wechselnde und ruhende Anteile hierzu gerechnet werden.
- das örtliche Konzept, bei dem auf der Basis der Dehnungsamplituden eines kleinen Werkstoffvolumens im Rückgriff auf zyklische Werkstoffdaten eine Bauteilschädigung bestimmt wird.
- das bruch- bzw. fließbruchmechanische Konzept, bei dem ausgehend von bruchmechanischen Herleitungen und gestützt auf empirische Rißfortschritts-gesetze sowohl die Phase der Rißentstehung als auch des Rißfortschritts betrachtet wird
- Konzepte zur Modellbildung fehlerbehafteter Werkstoffe, die ein Materialversagen über das Entstehen, Vergrößern und Zusammenwachsen von Fehlstellen oder Versetzungen im Material beschreiben. Durch die Formulierung eines Materialgesetzes handelt es sich um globale Verfahren.

Gerade für den Rißfortschritt duktiler Materialien werden die beiden letztgenannten Verfahren auch kombiniert eingesetzt, was häufig als 'local approach to fracture' bezeichnet wird (ARGON 1992).

Eine so stark verkürzte Darstellung wird sicherlich den Verfahren nicht gerecht, hinter denen sich teilweise komplette Lehrmeinungen oder "Betriebsfestigkeits-Schulen" verbergen. Dies sei dem Verfasser verziehen; es geschieht nicht in geringschätziger Absicht.

### 3.3 Anwendung der Verfahren

Schaut man zunächst einmal auf die Verbreitung der dargestellten Verfahren, indem man zum Beispiel internationale Fachzeitschriften zu dem Themengebiet auswertet, ist deutlich erkennbar, daß der englischsprachige und japanische Raum den Schwerpunkt eindeutig auf bruchmechanische Konzepte legen. Das deutschsprachige Gebiet weist eine größere Bandbreite der diskutierten Ansätze auf, eine Einschätzung, die sich durchaus auch historisch erklären läßt (NEUBER 1985).

Betrachtet man den Einsatz der Konzepte in Deutschland im allgemeinen Maschinenbau, läßt sich das Nennspannungskonzept - trotz immer wieder diskutierter Schwächen - sicher als *das* Verfahren bezeichnen (ZENNER 1992). Dies liegt neben der den Ingenieuren bereits in der Ausbildung vermittelten Begriffswelt nicht zuletzt an dem zeitlichen Vorsprung, den es gegenüber anderen Verfahren hat.

In speziellen Gebieten wie Luft- und Raumfahrttechnik oder Kernkraft-Anwendungen werden allerdings durchaus die lokalen oder bruchmechanischen Konzepte verwendet. Ein gegenüber der klassischen Festigkeitslehre stark abweichendes Vorgehen und Vokabular und ein bedingt durch starken Rechneinsatz abstrakterer Zugang zum Problem stehen mit Sicherheit einer weiteren Verbreitung im Wege. Einige dieser Nachteile sollen durch das kürzlich entwickelte 'Engineering Treatment Model (ETM)' kompensiert werden, das auf der Bruchmechanik fußt, jedoch durch zusammengefaßte, einfache Formeln sogar überschlägige Rechnungen "von Hand" zuläßt (SCHWALBE 1991).

Nach dieser Einschätzung könnte für eine Wellenberechnungsnorm am wahrscheinlichsten ein auf dem Nennspannungskonzept beruhendes Verfahren die geforderten Kriterien einer allgemein akzeptierten Vorgehensweise und einer zu erwartenden breiten Anwendung in der Praxis erfüllen.

### 3.4 Anwendung der Verfahren für Wellen

Das Nennspannungskonzept hat den klaren Vorteil, daß durch den Vergleich mit einer Nennspannungswöhlerlinie der Welle bzw. der gesamten Welle-Nabe-Verbindung alle Einflüsse auf die Schwingfestigkeit realistisch erfaßt sind. Sucht man jedoch in der Literatur nach Wöhlerlinien zum Beispiel einer Paßfederverbindung, stellt man schnell fest, daß nur wenig statistisch abgesicherte Ergebnisse vorliegen. Es sei hier noch einmal darauf hingewiesen, daß es keinesfalls zulässig ist, auf - um beim Beispiel zu bleiben - Wöhlerlinien genuteter Wellen zurückzugreifen. Sowohl das Problem der Krafteinleitung im Kerbbereich als auch der Schwingungsverschleiß wären dann nicht berücksichtigt.

Der Vorteil des Nennspannungskonzeptes, das betrachtete Phänomen ganzheitlich zu erfassen, schlägt hier ins Gegenteil um. Da keine Modellvorstellung des Schädigungsmechanismus' zugrunde liegt, ist das Erkennen von einzelnen Einflußgrößen auf die Lebensdauer der Verbindung nur mit großem experimentellem Aufwand durch Variation der vermutlich bedeutsamen Parameter möglich. Bis die zu erstellende Norm über diesen Weg den Anspruch der umfassenden Berücksichtigung aller technisch relevanten Lösungen erreichen würde, wäre selbst bei Verwendung normierter Wöhlerlinien noch eine große Anstrengung nötig.

Ein Vorgehen nach dem lokalen Konzept könnte die Probleme der Mehrfachkerbwirkung und Krafteinleitung erfassen. Auch wäre durch den möglichen Rechneinsatz - gestützt auf experimentelle Basiswerte - die Durchführung von Parametervariationen eher vorstellbar. Die Problematik des Schwingungsverschleißes ist jedoch momentan nicht erfaßbar, da bei dem lokalen Konzept das zyklische Werkstoffverhalten an einem einzelnen, glatten Probestab ermittelt wird. Ist es schon generell umstritten, ob der Weg dieser Versuchsergebnisse bis hin zum Vergleich mit dem komplex beanspruchten Bauteilvolumen nicht zu weit und fehleranfällig ist, so wäre eine Anwendung auf das tribologische System eines schwingungsverschleiß-beanspruchten Bauteils kaum zulässig, selbst wenn es möglich sein sollte, die Dehnungsamplituden in den betreffenden Bauteilbereichen zu bestimmen.

Bruchmechanische Ansätze wären im Sinne einer Modellbildung, die einzelne Phasen des Schädigungsmechanismus' abbilden kann, die erfolgversprechendste Lösung. Ohne auf Einzelheiten eines möglichen Vorgehens einzugehen (vgl. hierzu GÜNTHER/OLDENDORF/STENGER 1994), ist jedoch auch dabei mit großen Schwierigkeiten bei der Darstellung der Rißöffnungs- und -schließvorgänge unter Wechselwirkung von zwei oder mehr Bauteilen zu

rechnen. Gerade die bereits angesprochene Einsicht in den Schädigungsablauf könnte jedoch zu einer deutlichen Verringerung und gezielteren Untersuchung von Parametern führen.

Weiterhin darf nicht übersehen werden, daß bruchmechanische Kennwerte in mittlerweile großer Zahl vorliegen und dadurch eventuell Grundsatzuntersuchungen, zum Beispiel zu Werkstoffen, entfallen können.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Wie wahrscheinlich ist es nach dem bisher Gesagten, daß dem Normausschuß bei der Wellenberechnung "der große Wurf" gelingt?

Aus Sicht der Anwender müßte ein Verfahren gewählt werden, das für technisch relevante Probleme weder die notwendigen Daten im Zugriff hat noch diese mit vertretbarem Aufwand erhalten kann. Mit der Zielsetzung der Beherrschung bzw. Modellbildung der wellentypischen Probleme müßten Ansätze gewählt werden, die Kenngrößen und Vorgehensweisen erfordern und produzieren, die im allgemeinen Maschinenbau auf Zurückhaltung stoßen dürften.

Der Verfasser ist sicherlich überfordert, diesen Konflikt zu lösen, zumal - selbst wenn man die Sonderprobleme nicht beachtet - die internationale Diskussion um eine rechnerische Lebensdauerabschätzung in vollem Gang ist. Der gleichzeitig aktive Gesamtarbeitskreis "Bauteilfestigkeit" des Forschungskuratoriums Maschinenbau (FKM) jedoch, in dem renommierte Vertreter aller zur Diskussion stehenden Konzepte vertreten sind, wird sicher grundlegende Vorschläge hierzu machen können.

Gerade die Welle-Nabe-Verbindungen, die jeweils für sich Spezialfälle darstellen, sollten nach Meinung des Verfassers aus der Norm ausgegliedert werden bzw. bleiben. Die Diskussion der Paßfederberechnungsnorm hat gezeigt, wieviel Wissen und Erfahrung, aber auch welcher zeitliche Rahmen notwendig sind, um eine einzelne Verbindungsart sinnvoll zu erfassen, ohne daß beim momentanen Stand von einer vollständigen Lösung aller Probleme gesprochen werden kann. Die Vorstellung, den Normausschuß zur Wellenberechnung alle weiteren Verbindungsarten in ähnlicher Weise bearbeiten zu lassen, läßt einen Entwurf in weite Ferne rücken.

Sicherlich unumgänglich ist die Definition von Schnittstellen, von denen aus der Wellenberechnung heraus zu den Berechnungsnormen der Welle-Nabe-Verbindungen verzweigt wird. Einem Unterprogrammaufruf ähnlich, können diese Normen Werte zurückliefern, die im Fortgang der Wellenberechnung Verwendung finden. Durch ein solches Vorgehen wäre auch eine Entkopplung der zur Anwendung kommenden Berechnungskonzepte möglich. Im Rahmen der Paßfederberechnung könnten so zum Beispiel bruchmechanische Konzepte verwendet werden, die nach entsprechender Umrechnung an das "Hauptprogramm Wellenberechnung" eine definierte Kenngröße zurückliefern, die in das dort verwendete Konzept paßt.

Bei der Größe der Aufgabe kann man dem Normausschuß nur viel Erfolg und einen "langen Atem" wünschen. Und auch dann wird man sich zuweilen der Erkenntnis Walentin Falins beugen müssen:

*Es fehlt immer ein Minimum,  
um ein Maximum zu erreichen.*

## 5. Literatur

- ARGON, A. S. (1992): Topics in Fracture and Fatigue  
Berlin: Springer-Verlag 1992
- DIETZ, P.; SCHÄFER, G.; WESOŁOWSKI, K. (1993): Zahnwellenverbindungen - Beanspruchungs- und Verschleißverhalten  
Konstruktion 45 (1993), S. 227 - 234
- DUBBEL (1983): Taschenbuch für den Maschinenbau  
Hrsg. v. Beitz, W.; Küttner, K.-H.  
15. korrig. u. erg. Auflage, Berlin: Springer-Verlag 1983
- GÖTTLICHER, Ch. (1994): Festigkeitsuntersuchung von genormten und optimierten Polygon-Welle-Nabe-Verbindungen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente  
Zur Dissertation vorgelegt, TH Darmstadt 1994
- GÜNTHER, V. ; OLDENDORF, U.; STENGER, R. (1994): Tischvorlage zur FVA-Arbeitskreis-sitzung "Welle-Nabe-Verbindungen" am 17.02.1994
- LINKE, H. (1994): Schriftliche Stellungnahme des Instituts Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion der TU Dresden vom 16.02.1994 zur Normung der Wellenberechnung
- NEUBER, H. (1985): Kerbspannunglehre  
3. völlig neubearb. u. erw. Auflage, Berlin: Springer-Verlag 1985
- NIEMANN, G. (1982): Maschinenelemente, Band 1  
2. neubearb. Auflage, Berlin: Springer-Verlag 1982
- PERSEKE, W. (1984): Untersuchung zur Mehrfachkerbwirkung beim Zusammentreffen von Paßfedernut und Wellenabsatz sowie Paßfedernut und Sicherungsringnut  
Dissertation TH Darmstadt 1984
- RENNEISEN, A. (1993): Untersuchungen zur Beanspruchung von Paßfederverbindungen unter überlagerter Biege- und Torsionsbelastung  
Dissertation TH Darmstadt 1993
- SCHWALBE, K.-H.; CORNEC, A. (1991): The Engineering Treatment Model (ETM) and its practical application  
Int. Journal of Fatigue and Fract. Engng. Mater. Struct. 14 (1991) 4, S. 405 - 412
- THEIßEN, S. (1994): Schriftlicher Vorschlag der Friedrich Flender AG, Bocholt vom 21.02.1994 zur Ergänzung des Normentwurfs DIN 6892
- VDI-RICHTLINIE 2226 (1965): Empfehlung für die Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile (mittlerweile zurückgezogen)  
Düsseldorf: VDI-Verlag 1965
- WEIGAND, M. (1991): Untersuchung der Beanspruchungen von Paßfederverbindungen bei umlaufender Biegebelastung  
Dissertation TH Darmstadt 1991

- ZANG, R. (1987): Beanspruchungen in der Welle einer Paßfederverbindung bei statischer und dynamischer Torsionsbelastung  
Dissertation TH Darmstadt 1987
- ZENNER, H.; LIU, J. (1992): Vorschlag zur Verbesserung der Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept  
Konstruktion 44 (1992), S. 9 - 17



# **Spannungsanalyse mit Hilfe von Spannungsoptik und Finite-Elemente-Methode - ein Vergleich**

von Ralph Stenger

## **1 Einleitung**

Die Anforderungen an technische Produkte bestehen in der sicheren Funktionserfüllung, der kostengünstigen Herstellung und der engen Orientierung an die Bedürfnisse des Marktes. Bei der Entwicklung von technischen Produkten sind daher Kompromisse einzugehen, zu deren Optimierung vielfach die Spannungsanalyse eingesetzt wird. Konkret ist es das Ziel der Spannungsanalytik die Festigkeitsberechnung und Bauteilgestaltung zu verbessern, sowie bei aufgetretenen Schadensfällen die Versagensursachen zu erklären.

Man unterscheidet zwischen experimenteller und der rechnerischer Spannungsanalyse. Auf dem Gebiet der experimentellen Spannungsanalyse wird u. a. das Verfahren der Spannungsoptik und auf der rechnerisch/numerischen Seite die Finite-Elemente-Methode (FEM) angewendet. Den Gründen, die aus meiner Sicht und meinen bisherigen Erfahrungen einerseits für den Einsatz der spannungsoptischen Untersuchungsmethode andererseits für eine Finite-Elemente (FE) -Berechnung sprechen, ist diese Abhandlung gewidmet. Es soll damit auch der weit verbreiteten Meinung entgegengetreten werden, daß mit dem derzeitigen Entwicklungsstand der FEM der experimentellen Spannungsanalytik keine Bedeutung mehr zukommt.

In der weiteren Abhandlung wird das Themengebiet in verschiedene Einzelteile untergliedert. Zunächst werden in Kapitel 2 Genauigkeit und Aufwand für das jeweilige Verfahren aufgezeigt. Ziel des Kapitel 3 ist es darzustellen, bei welchen Problemstellungen die beiden Methoden vorteilhaft bzw. überhaupt anwendbar sind. Weiterhin werden die stark kostenbeeinflussenden Rahmenbedingungen zur Durchführung der einen oder anderen Methode beschrieben (Kapitel 4). Aus diesen Ergebnissen werden abschließend Schlußfolgerungen für die Anwendbarkeit der beiden Verfahren in Abhängigkeit einer vorgegebenen Problemstellung gezogen.

## 2 Spannungsoptik und Finite-Elemente-Methode im Hinblick auf mögliche Fehlerquellen und Ungenauigkeiten

### 2.1 Spannungsoptische Untersuchungsverfahren

Bei der Durchführung eines spannungsoptischen Versuches wird die Genauigkeit der Untersuchungsergebnisse von dem Modellwerkstoff, dem Versuchsaufbau, den Meßinstrumenten und der Auswertung der Isochromaten bzw. der Isoklinen bestimmt. Isochromaten werden aufgrund des spannungsdoppelbrechenden Effektes der für die Spannungsoptik geeigneten Materialien hervorgerufen und sind Linien gleicher Hauptspannungsdifferenzen; Linien mit gleicher Hauptspannungsrichtung nennt man Isoklinen.

Bei der Auswahl des Werkstoffes ist auf hohe optische Empfindlichkeit, lineare Abhängigkeit von Spannung, Dehnung und Isochromatenordnung, Haltbarkeit, Unempfindlichkeit gegen Kriechen, Isotropie und leichte Modellherstellung zu achten. Dem zuletzt genannten Punkt ist vor allem im Hinblick auf die neuere Entwicklung der Stereolithografie (vgl. [10]) besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die Stereolithographie ist ein Verfahren zur Herstellung von spannungsoptischen Modellen auf der Basis von UV-Licht aushärtendem Harz. Durch einen computergesteuerten Laser ist es möglich, komplexe Modelle nach CAD-Daten sehr schnell herzustellen.

Genauigkeitsverluste durch den Versuchsaufbau können bei sorgfältiger Vorgehensweise vermieden werden. Außerdem sind evtl. auftretende Fehlerquellen leicht zu lokalisieren und zu beheben. Der Vorteil besteht darin, daß mit einem geeigneten Versuchsaufbau realitätsnahe Randbedingungen zu verwirklichen sind.

Die Auswertung der spannungsoptischen Bilder stellt nach wie vor die größten Anforderungen an die Versuchsdurchführung. Meistens interessieren bei der Auslegung von Bauteilen besonders Gebiete hoher Spannungsgradienten und damit eng beieinander liegender Isochromaten. Die Auswertbarkeit solcher Bereiche hängt wesentlich von der Vergrößerung durch die Betrachtungsinstrumente ab. Zur Anwendung kommen hierbei Fadenfernrohre, sowie bei der fotografischen Aufnahme Lupenobjektive und Objektive mit langen Brennweiten. Bei der Verwendung von Objektiven mit großen Brennweiten kann im Gegensatz zu den Aufnahmen mit den Lupenobjektiven ein großer Aufnahmeabstand eingehalten werden. Dies wirkt sich in der Minimierung der Abbildungsfehler durch nicht-parallele Strahlen aus. Darüber hinaus muß darauf geachtet werden, daß die Filmebene der Kamera und die Objektebene sehr genau parallel zueinander ausgerichtet sind.

Eine Möglichkeit, die Auswertegenauigkeit einer spannungsoptischen Untersuchung zu steigern, liegt in der Vergrößerung des Modells im Vergleich zum Original. Hierbei sind allerdings die Modellgesetze zu beachten (siehe [5], S. 113-122).

Ist die genaue Erfassung der Isochromatenordnung aufgrund zu großer Spannungsgradienten dennoch nicht möglich, werden die Isochromatenverläufe häufig extrapoliert. Hierbei kann das Problem auftreten, daß durch den starken Anstieg der Isochromatenordnungen bei großen Spannungsgradienten eine Extrapolation unsicher wird.



Große Einflußnahme auf die Ergebnisse hat ebenfalls die Auswertung der Isoklinenverläufe. Häufig werden, um die Auswertbarkeit zu verbessern, entsprechende Modelle aus Plexiglas verwendet, deren geringe optische Empfindlichkeit die Ausprägung der in diesem Fall störenden Isochromatenordnungen weitestgehend verhindert. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von Plexiglas als Modellwerkstoff besteht in der besseren Beobachtbarkeit und der subjektiv schärfer abgegrenzten Isoklinen durch den klaren Modellwerkstoff (siehe [9], S. 19).

Neuere Forschungsentwicklungen in der Auswertung von spannungsoptischen Bildern liegen auf dem Gebiet der digitalen Bildverarbeitung [6],[7]. Hierbei wird vor allem versucht den Auswertevorgang zu automatisieren.

## 2.2 Methode der Finiten-Elemente

Während beim spannungsoptischen Verfahren als erster Schritt die Herstellung der spannungsoptischen Modelle genannt werden muß, steht am Anfang einer FE-Berechnung die Abbildung eines in der Realität vorhandenen technischen Produktes auf ein mechanisches Ersatzmodell. Hierbei werden z.B. durch die Definition der Randbedingungen, der Krafteinleitung, sowie evtl. vorhandener Symmetrieebenen vereinfachende Annahmen getroffen, deren Einfluß auf die Berechnungsergebnisse vernachlässigbar sein muß. Der Nachteil gegenüber der Spannungsoptik besteht darin, daß dieser Schritt die Beurteilung der ursprünglich vorhandenen Aufgabenstellung erschweren kann. Andererseits ist es durch eine gewisse Abstraktion möglich, bestimmte Teilbereiche aus der Gesamtthematik herausgelöst zu betrachten und somit insgesamt einen tieferen Einblick in die Zusammenhänge einer Problemstellung zu bekommen.

Wurde ein mechanisches Ersatzmodell festgelegt, schließt sich dessen Diskretisierung mit Hilfe der Finiten Elemente an. Die erste Festlegung bei der Modellierung eines FE-Netzes besteht in der Auswahl von - für die jeweilige Anwendung - leistungsfähigen Elementen. Diese Auswahl ist ein ganz wesentlicher Punkt in der Vorgehensweise einer FE-Berechnung. Vernünftige Berechnungsergebnisse sind nur dann zu erwarten, wenn die Finiten Elemente innerhalb ihrer Anwendungsgrenzen bei der jeweiligen Problemstellung eingesetzt werden. Außerdem gilt, daß gerade in den (meist interessanten) Gebieten hoher Spannungsgradienten ein FE-Netz (in Abhängigkeit des Elementansatzes) ausreichend fein diskretisiert werden muß, um sicherzustellen, daß die FE-Lösung auf die exakte Lösung des mechanischen Modells konvergiert.

Die Diskretisierung der FE-Struktur ist von entscheidender Bedeutung für die Güte der Berechnungsergebnisse. Aus diesem Grund muß diese Phase einer FE-Untersuchung mit größter Sorgfalt durchgeführt werden. Zur Kontrolle der Netzdiskretisierung stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, von denen drei im folgenden vorgestellt werden.

1. Entlang eines repräsentativen Pfades zwischen den Elementen werden die berechneten Spannungen aufgetragen. Ist das Netz ausreichend fein, wird sich ein stetiger Spannungsverlauf ergeben.

2. Alternativ können "stress-band-plots" erzeugt werden. In diesen werden Gebiete gleicher Spannungen farblich abgestuft kenntlich gemacht. Zeichnen sich in einem "stress-band-plot" Diskontinuitäten ab, besitzt das Netz keinen ausreichenden Feinheitsgrad. Wichtig hierbei ist, daß die Berechnungsergebnisse der Lösungsvariablen (Integrationspunkte) nicht - wie häufig üblich - gemittelt dargestellt werden.
3. Ein FE-Netz wird solange verfeinert, bis sich zwei aufeinanderfolgende Lösungen hinreichend wenig voneinander unterscheiden.

Alle Verfahren bedingen ein schrittweises Vorgehen, so daß die Erzeugung einer leistungsfähigen FE-Struktur unter Umständen mit sehr viel Aufwand verbunden sein kann. Um Rechenzeit einzusparen, ist darauf zu achten, das FE-Netz nur an den vorher festgelegten auszuwertenden Stellen ausreichend fein zu gestalten.

### 2.3 Abschließende Betrachtung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß bei der Spannungsoptik neben der Modellherstellung die Schwierigkeit und der Aufwand in der Auswertung der spannungsoptischen Bilder liegt. Unabhängig von der quantitativen Bestimmung der Spannungsverläufe in den spannungsoptischen Modellen ist als großer Vorteil des spannungsoptischen Verfahrens - zumindest bei ebenen Untersuchungen - die Möglichkeit der sofortigen qualitativen Beurteilung des Gesamtverhaltens der Bauteile zu nennen.

Die Genauigkeit einer FE-Berechnung wird neben den Unterschieden, die in der verwendeten Software (vgl. hierzu z.B. [4], S. 6-82) und Hardware (begrenzte Stellenanzahl des Rechners) begründet liegen, durch die Güte des Netzes bestimmt. Die Auswertbarkeit und Darstellbarkeit der Berechnungsergebnisse ist einfach und überzeugend. Diese Vorteile setzt man neben dem eigentlichen Zweck auch vielfach in der Werbung und Produktdarstellung ein. Die Gefahr dieser Darstellungen liegt jedoch darin, daß sie in ein "blindes" Vertrauen auf die Berechnungsergebnisse münden, oder zu der Meinung führen können, daß alle spannungsanalytischen Problemstellungen alleine mit Hilfe der FEM lösbar werden.

Aus mehreren Untersuchungen ([2],[9],[12],[13]) ist zu entnehmen, daß die erzielbare Genauigkeit in Abhängigkeit vom Aufwand - zumindest bei linearen Problemstellungen (vgl. Kapitel 3) - bei beiden Methoden gleich ist.

### 3 Verwendbarkeit der Untersuchungsmethode in Abhängigkeit der Problemstellung

#### 3.1 Spannungsoptik

Man unterscheidet in der Spannungsoptik grundsätzlich zwischen ebenen und räumlichen Problemstellungen. Während bei ebenen Untersuchungen das spannungsoptische Modell aus dem Rohmaterial (Epoxidharz) herausgearbeitet und belastet werden kann, erfordern räumliche Betrachtungen andere Verfahren. Das am häufigsten eingesetzte Verfahren ist unter dem Begriff Einfrierverfahren bekannt. Dabei können mit Hilfe von stark vernetzten Kunststoffen (Duroplasten) die bei erhöhten Temperaturen (ca. 150° C) aufgetragenen Verformungen und Spannungen durch einen nachfolgenden Abkühlvorgang festgehalten (eingefroren) werden. Anschließend arbeitet man Schnitte aus dem Modell heraus, die nachdem sie geschliffen und poliert wurden, auswertbar sind. Dieses Verfahren beinhaltet eine Vielzahl von Bearbeitungsschritten. Bedenkt man zusätzlich die erneute Modellherstellung für jede weitere Belastungsvariation, so ist ein starker Anstieg von Aufwand und Kosten des Einfrierverfahrens im Vergleich zur ebenen Untersuchung festzustellen.

In der Spannungsoptik bestehen Einschränkungen dahingehend, Plastifizierungen des Originalbauteils zu beurteilen. Dies resultiert aus der nicht mehr vorhandenen Vergleichbarkeit der für die Spannungsoptik besonders geeigneten Modellwerkstoffe und dem Verhalten von Eisenwerkstoffen bei Überschreitung der Linearitätsgrenze zwischen Spannung und Dehnung im Originalbauteil. In [3] wird deswegen das Abfräsvorgang zur Simulation eines nichtlinearen Werkstoffverhaltens für den ebenen Fall vorgestellt. Der hierbei entstehende zeitliche Aufwand entspricht nach den Angaben in [3] dem Auswerten eines Einfrierversuches.

Insgesamt ist zu sagen, daß die Simulation der plastischen Verformungen nur in ebenen Untersuchungen möglich und mit sehr großem Aufwand verbunden ist.

#### 3.2 Finite-Elemente-Methode

In den FE-Berechnungsverfahren sind grundsätzlich keine methodischen Unterschiede in der Untersuchung von ebenen oder räumlichen Problemstellungen vorhanden. Auch die Werkstoffnichtlinearität (wie auch die geometrische Nichtlinearität, hervorgerufen durch große Verschiebungen) ist mit den heute in den meisten großen FE-Programmen implementierten Lösungsalgorithmen beherrschbar. Ähnlich zur Spannungsoptik muß allerdings eine Werkstoffkennlinie für das Bauteilverhalten vorgegeben werden. Dies ist teilweise nur eingeschränkt möglich, da die meisten Werkstoffkenngrößen an genormten Flach- oder Rundstäben durchgeführt werden und dadurch Spannungs-Dehnungs-Kurven des einachsigen Zugversuches auf mehrachsige Spannungszustände übertragen werden müssen.

Anders dagegen sind Berechnungen stärkerer Nichtlinearitäten zu beurteilen. Es seien hier vor allem zwei Problemstellungen genannt:

1. Nichtlinearitäten aufgrund geometrischer Instabilitäten (z.B.: Knickung, Beulung, "Snap-Through"-Effekt).
2. Nichtlinearitäten hervorgerufen durch Randbedingungsänderungen (z.B.: Rißbildung, Kontakt).

zu 1:

Geometrische Instabilitäten treten beispielsweise in Form von Knickung an Stäben, oder Beul- und "Snap-Through"-Effekten bei der Beanspruchung von Schalenträgwerken, z. B. Fahrzeugkarosserieaußenhautblechen (siehe [11]) auf. Kraft-Verformungsbeziehungen für Knickungs-, Beul- oder Durchschlagsprobleme weisen bis zu einem kritischen Punkt ein stabiles Tragverhalten auf (Vorbeulbereich), d.h. bei Wegnahme der Belastung kehrt die Struktur wieder in die Ausgangslage zurück. Wird der kritische Punkt - in dem eine indifferente Gleichgewichtslage vorliegt - überschritten, nimmt die Kraft bei zunehmender Verformung ab und die Struktur kann nicht mehr von alleine in die Ausgangslage zurückkehren (Nachbeulbereich). Häufig tritt jedoch eine erneute indifferente Gleichgewichtslage auf, nach der das System wieder ein stabiles Verhalten aufweist. Die Kenntnis des ersten kritischen Punktes ist von großer Bedeutung für die Praxis, da ab dann das Tragwerk ein rapide abnehmendes Stabilitätsverhalten einnimmt. Um die Lage des kritischen Punktes zu bestimmen, können verschiedene Verfahren (Eigenwertmethode, iterative Verfahren oder eine Kombination der Eigenwertmethode mit den iterativen Verfahren) abhängig von dem Kraft-Verformungsverlauf im Vorbeulbereich eingesetzt werden. Diese Verfahren unterscheiden sich jedoch erheblich in ihrer Wirtschaftlichkeit (Rechenzeitbedarf).

Insgesamt ist zu sagen, daß kritische Punkte von Tragwerken mit Hilfe der genannten Verfahren sehr gut bestimmen lassen.

Schwieriger zu beurteilen sind die bei Stabilitätsproblemen auftretenden Verzweigungspunkte. Die Art und das Auftreten der Verzweigungspunkte ist abhängig von der Imperfektion des betrachteten Bauteils. D. h. an einem bestimmten Punkt des Kraft-Verschiebungsverlaufes kann die Struktur abhängig von kleinen Störeinflüssen (äußere Kräfte, Randbedingungen, Abweichungen von der ideal vorgegebenen Geometrie durch Fertigungsfehler, Materialfehler, Ungenauigkeiten bei der Lasteinleitung und idealisierungsbedingte Abweichungen) zwei mögliche Kraft-Verschiebungsverläufe einnehmen. Schon im praktischen Versuch sind die Auswirkungen der Imperfektionen auf ein Strukturverhalten schwer zu bestimmen, so daß die Ergebnisse der durch die immer idealisierungsbedingt imperfekte FE-Simulation äußerst kritisch beurteilt werden müssen.

Durch die hier aufgeführten Punkte wird deutlich, daß die Berechenbarkeit einer Aufgabenstellung erheblich von dem Wesen des Problems abhängig sein kann. Im voraus ist es teilweise nicht möglich zu beurteilen wie effizient die FEM bei einer bestimmten Problemstellung eingesetzt werden kann.

zu 2:

Nichtlineares Strukturverhalten tritt weiterhin bei der Berechnung von Kontaktproblemen in unterschiedlicher Stärke auf. Kontaktprobleme stellen sich bei einer Vielzahl von technischen Aufgabenstellungen. Themengebiete am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik, bei der die Beherrschung des Kontaktalgorithmus (es wird das FE-Programm MARC verwendet) in der FEM eine entscheidende Rolle spielt, liegen in der Berechnung von Schraubenverbin-

dungen, der Auslegung von Paßfederverbindungen und der Untersuchung von Rollenketten. Im Rahmen dieser Untersuchungen hat sich gezeigt, daß die Kontaktberechnung äußerst aufwendig und große programmspezifische Erfahrungen voraussetzt, um gesicherte Ergebnisse zu erlangen. Neben nur eingeschränkt (z. B. unter Vernachlässigung der Reibung) berechenbaren Problemstellungen konnte bisher das axiale Einpressen der mit Übermaß hergestellten Buchse in die Innenlasche eines Kettengliedes [1] nicht zufriedenstellend simuliert werden. Dieser Vorgang mußte ersatzweise durch das radiale Schrumpfen der Buchse durch von außen angebrachte Kräfte, anschließendem Fügen der beiden Bauteile und nachfolgendem Wegnehmen der äußeren Kräfte abgebildet werden.

Auch auf dem Gebiet der Kontaktprobleme ist es für den Aufwand und Erfolg der Berechnung von ganz entscheidender Bedeutung, welche Themenstellung bearbeitet werden soll. Weitere Forschungstätigkeiten auf diesem Gebiet sind stark abhängig von der Entwicklung der FE-Programme. Aus diesem Grund kommt der Kooperation von Anwendern mit dem Programmhersteller eine entscheidende Bedeutung zu und es wäre wünschenswert, wenn sich einzelne Programme für bestimmte Berechnungsprobleme etablieren könnten.

Abschließend ist zu sagen, daß es bei der Untersuchung von stark nichtlinearen Vorgängen sinnvoll und teilweise sogar notwendig ist, alternative Verfahren zur Methode der Finiten Elemente einzusetzen. Besonders bei der Untersuchung von Kontaktproblemen bietet die Spannungsoptik eine Reihe von Vorteilen - beispielsweise ist es möglich die Spannungsverteilung kontinuierlich über die ganze Berührungsfläche zu betrachten - gegenüber anderen experimentellen Verfahren (vgl. hierzu die DMS-Technik).

#### **4 Personelle und materielle Voraussetzungen zur Durchführung der spannungsanalytischen Verfahren**

Voraussetzung zur Durchführung von spannungsoptischen Untersuchungen ist eine gut ausgestattete Werkstatt mit qualifiziertem Personal. Aufgrund der vielfältigen Aufgaben im spannungsoptischen Labor werden an die Mitarbeiter höhere Anforderungen gestellt als dies gewöhnlich in mechanischen Werkstätten der Fall ist. Genannt seien in diesem Zusammenhang die besonderen Bearbeitungsschritte an den empfindlichen Modellen und das Herstellen der Belastungsvorrichtungen vielfältiger Art. Neben der Werkstatt sind weitere Räumlichkeiten notwendig, um spannungsoptische Untersuchungen durchführen zu können. Zu dem eigentlichen Experimentierlabor kommt ein abgetrennter Raum für die Lagerung der Versuchswerkstoffe und die Durchführung des Einfrierversuchs hinzu. Sinnvoll ist weiterhin die Einrichtung einer Dunkelkammer zum Entwickeln und Vergrößern der spannungsoptischen Aufnahmen.

Bei der Methode der Finiten Elemente ist es Voraussetzung auf eine leistungsfähige Rechenanlage zugreifen zu können. Eine entscheidende Rolle für die Berechenbarkeit schwieriger Problemstellungen spielt weiterhin die zur Verfügung stehende Software. Software und Hardware müssen aufeinander abgestimmt werden. So wäre es beispielsweise wenig sinnvoll, FE-Programme zur Berechnung stark nichtlinearer Problemstellungen auf einem Personal Computer zu implementieren. Von großer Bedeutung ist zusätzlich die Wartungsfrage der Rechenanlage. Von ihr hängt die Einsatzfähigkeit und Verfügbarkeit des "Werkzeuges" des Be-

rechnungsingenieurs in besonderem Maße ab. Wenn möglich sollte der Berechnungsingenieur nicht mit diesen Aufgaben belastet werden.

Man kann sagen, daß trotz der hohen Anschaffungskosten einer leistungsfähigen Rechenanlage, Spannungsanalysen mit Hilfe der FEM vielfach günstiger durchzuführen sind, als mit der Spannungsoptik. Besonders die Personalkosten und die Notwendigkeit, mehrere Räumlichkeiten zur Verfügung zu stellen, geben hierfür den Ausschlag.

## 5    **Schlußfolgerungen und Zusammenfassung**

Aus den aufgeführten Punkten läßt sich schließen, daß sich je nach vorgegebener Problemstellung mit Hilfe der Spannungsoptik und der FEM folgende Möglichkeiten zur Verwendung beider Verfahren ergeben:

- Es kann bzw. muß ausschließlich ein Verfahren angewendet werden.
- Beide Verfahren werden kombiniert, sich gegenseitig ergänzend betrieben.
- Beide Verfahren werden parallel eingesetzt.

Wählt man nur eine der beiden Methoden, oder ist man dazu gezwungen, so ist der Anwendungsbereich von Beginn an festgelegt. Abhängig von der Problemstellung wird das gewählte Verfahren mehr oder weniger wirtschaftlich anzuwenden sein. Außerdem entsteht der Nachteil, daß keine gegenseitige Kontrolle der Ergebnisse erreicht wird. In der Praxis sollte aus diesem Grund selten ein Verfahren alleine zum Einsatz kommen.

Eine kombinierte Vorgehensweise nutzt die Vorteile des einen und des anderen Verfahrens. Sinnvoll erscheint es, die Spannungsoptik dazu einzusetzen Anhaltspunkte für die Güte des Netzes der FE-Untersuchung zu bekommen. Bei einmal bestehender Struktur ist es dann mit geringem Aufwand möglich Variationsrechnungen der Lasteinleitung und Parameterstudien der Randbedingungen durchzuführen.

Der Vorteil einer parallel rechnerisch und experimentell durchgeführten Untersuchung liegt darin, daß eine Erhöhung der Sicherheit, auch dann wenn jede Methode für sich alleine das Problem lösen könnte, erreicht wird. Mit dieser hybriden Vorgehensweise können z.B. die Auswirkungen von menschlichen Fehlern (Denkfehler bei der Aufbereitung der Problemstellung und manuelle Fehler bei der Durchführung der Untersuchung) verringert werden.

Aufgrund der Entwicklung der FE-Software, dem günstiger werdenden Preis-Leistungsverhältnis der Rechnerkapazitäten sowie der Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der Spannungsoptik ist eine andauernde Überprüfung der Vor- und Nachteile beider Methoden notwendig.

## 6. Literatur

- [1] Brunnet, G.: Dimensionierung von Kettengelenkbauteilen mit Finit-Element-Methoden. Diplomarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik der TH Darmstadt, 1994
- [2] Brünings, W.-D.: Aussagefähigkeit optischer Meßverfahren zur experimentellen Verformungsanalyse verglichen mit Finit-Element-Berechnungen. 7. GESA-Symposium, VDI-Berichte 480, Düsseldorf: VDI-Verlag 1983.
- [3] Daffner, E.: Vergleichende spannungsoptische und FEM-Untersuchung eines elastoplastisch verformten Dichtringes. VDI-Berichte 366, GESA Symposium 1980.
- [4] Floyd, C.G.: The determination of stresses using a combined theoretical and experimental analysis approach; 2. International Conference on computational methods and experimental measurements, Kap. 6, S. 67-82.
- [5] Föppl, L.; Mönch, E.: Praktische Spannungsoptik. Berlin: Springer-Verlag 1972.
- [6] Gaupp, M.-M.: Die Digitale Bildverarbeitung als Hilfsmittel in der Spannungsoptik. - Verfahren und Möglichkeiten. Dissertation, Institut für Modellstatik der Universität Stuttgart 1989.
- [7] Hapel, K.H.: Stand der Technik und Entwicklungstendenzen in der Spannungsoptik. Vortrag bei der GESA-Sitzung - ZF Friedrichshafen, 1991.
- [8] Lechner, G. von Eiff, H. und Hirschmann, K.H.: Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzahnter Geradstirnräder. Festschrift Gerhard Pahl; S.85-106.
- [9] Oldendorf, U.: Vergleichende Untersuchung der Spannungsanalyse an Kerbstäben mit Hilfe der Spannungsoptik und der Methode der Finiten Elemente. Studienarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik TH Darmstadt 1990.
- [10] Steinchen, W. und Hirchenhain, A.: Fotopolymere der Stereolithografie als spannungsoptische Werkstoffe-Kalibrierung und Anwendung für ebene und räumliche Untersuchungen. Forschung im Ingenieurwesen, Bd 59 (1993), Nr. 7/8, S. 153-159.
- [11] Stenger, R.: Entwicklung eines rechnergestützten Verfahrens zur Beurteilung von Karosserieaußenflächen mit der FE-Methode. Diplomarbeit am Fachgebiet Leichtbau der TH Darmstadt 1993.
- [12] Villmer, J.: Vergleichende Betrachtung der Kerbspannungsanalyse an einem Walzenständer, durchgeführt mit der Spannungsoptik und der Methode der Finiten Elemente. Institut für Maschinenwesen TU Clausthal, Mitteilungen Nr.9, 03.1991.
- [13] Villmer, J.: FEM und SPO - eine vergleichende Betrachtung durchgeführter Spannungsanalysen. Institut für Maschinenwesen TU Clausthal, Mitteilungen Nr.10, 1992.
- [14] Wolf, H.: Spannungsoptik, Band1 Grundlagen. Berlin: Springer-Verlag 1976.





## **Verzeichnisse**



# **Verzeichnis der bisher am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik erstellten Dissertationen (Stand: März 1994)**

**BINZ, HANSGEORG**

Untersuchung des Einlaufverschleißverhaltens von Rollenketten unter besonderer Berücksichtigung der Buchse-Lasche-Preßverbindung

Dissertation TH Darmstadt, 1985

**BOEHME, ANDREAS**

Entwicklung einer heuristischen Analyse-methode zur Ermittlung ergonomiebezogener Schwachstellen in Wirksystemen

Dissertation TH Darmstadt, 1987

**EWALD, OTTO**

Tabellarische Lösungssammlung als Hilfsmittel für das methodische Konstruieren

Dissertation TH Darmstadt, 1974

**GRÖBER, HORST**

Systematische rechnerunterstützte Ermittlung von Produktanforderungen

Dissertation TH Darmstadt, 1992

**GUTBERLET, THOMAS**

Konzeptentwicklung zur informationellen Unterstützung ergonomiegerechten Konstruierens unter Einsatz rechnergestützter Wissensverarbeitung

Dissertation TH Darmstadt, 1990

**LANGER, HANS-PETER**

Verformungen in Flachriemen und Beitrag zur Bestimmung ihres mittleren Reibbeiwertes

Dissertation TH Darmstadt, 1977

**LÜPERTZ, HENNING**

Neue zeichnerische Darstellungsart zur Rationalisierung des Konstruktionsprozesses vornehmlich bei methodischen Vorgehensweisen

Dissertation TH Darmstadt, 1974

**MAYER, ERNST**

Das Schutzsystem, ein Element der mittelbaren Sicherheitstechnik aus kybernetischer und systemtheoretischer Sicht

Dissertation TH Darmstadt, 1975

**NEUDÖRFER, ALFRED**

Gesetzmäßigkeiten und systematische Lösungssammlungen der Anzeiger und Bedienteile

Dissertation TH Darmstadt, 1980

**PAWLIK, CHRISTIAN**

Untersuchungen über den Einfluß unterschiedlich oberflächenbehandelter Bolzen-/Buchsen-Paarungen auf das Verschleißverhalten von Rollenketten

Dissertation TH Darmstadt, 1990

**PERSEKE, WINFRIED**

Untersuchung zur Mehrfachkerbwirkung beim Zusammentreffen von Paßfedernut und Wellenabsatz sowie Paßfedernut und Sicherungsringnut

Dissertation TH Darmstadt, 1984

**RENNEISEN, ARMIN**

Untersuchungen zur Beanspruchung von Paßfederverbindungen unter überlagerter Biege- und Torsionsbelastung

Dissertation TH Darmstadt, 1992

ROGLER, ERNST

Entwicklung und Einsatz eines lernfähigen  
rechnergestützten Informationssystems für  
komplexe technische Systeme als Hilfsmit-  
tel zur Wissensverarbeitung  
Dissertation TH Darmstadt, 1988

SCHNEIDER, JÜRGEN

Konstruktionskataloge als Hilfsmittel bei  
der Entwicklung von Antrieben  
Dissertation TH Darmstadt, 1985

STORANDT, RALF

Systematische Untersuchung zur Verbesse-  
rung des Verletzungsschutzes im alpinen  
Skilauf und Konzeption eines neuen Ski-  
bindungssystems  
Dissertation TH Darmstadt, 1980

UNLAND, GEORG

Entwicklung eines Ultraschallzerstäu-  
bungsgeräts mit Hilfe der Konstruktions-  
systematik  
Dissertation TH Darmstadt, 1980

WEIGAND, MICHAEL

Untersuchung der Beanspruchung von Paß-  
federverbindungen bei umlaufender Biege-  
belastung  
Dissertation TH Darmstadt, 1991

ZANG, RUPERT

Beanspruchungen in der Welle einer Paß-  
federverbindung bei statischer und dyna-  
mischer Torsionsbelastung  
Dissertation TH Darmstadt, 1987

## **Verzeichnis der von Prof. Dr.-Ing. W. Raab als Korreferent betreuten Dissertationen**

ADLOCH, H.-J.  
Konstruktion überkritisch laufender  
Rührwerke mit Abdichtung  
1977

BARTH, T.  
Das mechanische Werkstoffverhalten  
härtpbarer Formstoffe bei Feuchteinwirkung  
1982

BEYER, C.  
Beitrag zur Ribitierung bei Spannungs-  
und Schwingungsrißkorrosion  
hochlegierter Chrom-Nickel-Stähle  
1992

BIEHL, K.  
Schädigungsmechanismen bei  
Spannungsrißkorrosion höher legierter  
Stähle in chloridhaltigen Medien  
1983

BIEKER, G.  
Lebensdauervorhersage plasmanitrierter  
bauteilähnlicher Proben mit Hilfe  
normierter Wöhlerstreubänder  
1992

BILL, K.  
Grundsatzuntersuchungen zum Einsatz  
elektrischer Radbremsen in  
Personenkraftfahrzeugen  
1992

BLÜMMEL, G.  
Untersuchungen zur Klärung des  
Verhaltens von Titan und eines ferritisch-  
austenitischen Chrom-Nickel-Stahles bei  
zeitlich veränderlicher mechanischer und  
gleichzeitig korrosiver Beanspruchung  
1986

BOMHAUER-BEINS, R.-U.  
Methode zum Bestimmen  
verschleißbedingter Kettenlängung  
1992

BRAISCH, P.  
Über die Wirkung einer  
Randschichtverfestigung auf die  
Schwingfestigkeit von Proben und  
Bauteilen, dargestellt am Beispiel der  
induktiven Randschichthärtung  
1981

CHRIST, E.  
Über die Auswirkung von unterbrochener  
und Langzeitexposition des Menschen mit  
stochastischen Fahrzeugschwingungen  
1973

DILLING, H. J.  
Methodisches Rationalisieren von  
Fertigungsprozessen am Beispiel  
montagegerechter Produktgestaltung  
1978

DREHER, K.  
Rechnergestützte Optimierung von  
Planeten-Koppelgetrieben  
1983

GLÜCK, M.  
Untersuchung des Rollverhaltens von  
Mehrwalzen-Systemen unter Einbeziehung  
einer viskoelastischen Walze  
1975

HEINRICH, J.  
Kerbwirkung an Sicherungsnuten und  
Berechnung von Sicherungsring-  
verbindungen  
1984

HESSEL, T.  
Stofftransport und reaktiver  
Werkstoffabbau in Thermoplasten bei der  
Einwirkung aggressiver Flüssigkeiten  
1990

HÜBER, W.  
Theoretische und experimentelle  
Untersuchungen an Wälzlager mit  
Festschmierstoffen  
1969

HUTTER, W.  
Erhöhung der Schwingfestigkeit von  
Tonnenfedern unter Berücksichtigung von  
Fertigungs- und Umgebungseinflüssen  
1990

JASCHINSKI-KRUZA, W.  
Beanspruchung bei Bildschirmarbeit: die  
Belastung der Augenmuskulatur bei  
verschiedenen Sehabständen  
1987

JENIK, P.  
Biomechanische Analyse ausgewählter  
Arbeitsbewegungen des Armes  
1972

KELP, D. V.  
Verhalten und Einsatz von Gelenkwellen  
mit Gummi-Kugelementen  
1972

KIRSCHBAUM, H.-D.  
Zur Berechnung des instationären, starr-  
körperkinetischen Bewegungsverhaltens  
von Krantriebwerken und der entsprechen-  
den Schnittgrößen bei besonderer Betrachtung der Verluste  
1977

KLOBERDANZ, H.  
Rechnerunterstützte Baureihenentwicklung  
1990

KÖSTER, L.  
Untersuchung der Kräfteverhältnisse in  
Zahnriemenantrieben  
(Hochschule der Bundeswehr, Hamburg)  
1980

KRAUSS, H.  
Die chloridinduzierte  
Spannungsrissskorrosion rost- und  
säurebeständiger Stähle - Prüfung -  
Klärung - Abhilfe  
1981

KRELL, U.  
Anforderungen an Ergometer - ein Beitrag  
zur Ergometrie  
1978

KROLLMANN, N.  
Charakterisierung und Bewertung der  
Änderung des physikalisch/chemischen  
Werkstoffzustandes und des resultierenden  
mechanischen Werkstoffverhaltens von  
witterungsbeanspruchten Polyethylen  
hoher Dichte  
1988

LENDEL, P.  
Statische und dynamische Analyse der  
Betätigungsbewegungen bei Fußstellteilen  
1977

LESSER, W.  
Ergonomische Untersuchung der  
Gestaltung antriebsrelevanter  
Einflußgrößen beim Rollstuhl mit  
Handantrieb  
1985

LOHKAMP, F.  
Ein Beitrag zur Ermittlung der Kugelkräfte  
sowie der Bewegungen der Kugeln und des  
Kugelkäfigs in einem stufenlos  
verstellbaren Kugelscheiben-Getriebe  
1991

MAGIN, W.  
Untersuchung des geometrischen Größen-  
einflusses bei Umlaufbiegebeanspruchung  
unter besonderer Berücksichtigung  
technologischer Einflüsse  
1981

MAINZER, J.  
Ermittlung und Normung von  
Körperkräften - dargestellt am Beispiel der  
statischen Betätigung von Handrädern  
1981

MAYER, A.  
Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim  
Einsatz von Schnellfrequenzfrässpindeln  
1989

- MÖLLER, K.  
Beitrag zur Problematik der Berechnung  
und Messung der Zugkräfte in Ketten von  
Kreisförderern  
1968
- MOST, E.  
Mathematische Verfahren und Hilfsmittel  
bei der Anwendung von Kostenwachstum-  
gesetzen für ähnliche Konstruktionen  
1989
- ROTH, T.  
Abscheidung, Untersuchung der  
mechanischen Eigenschaften und  
anwendungsbezogene Prüfung von TiN-  
und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Verschleißschichten,  
hergestellt nach dem Hochfrequenz-  
Kathodenzerstäubungsverfahren  
1988
- RÜCKERT, A.  
Ergonomische Bewertung manueller  
Lasthandhabungstätigkeiten in  
höhenbegrenzten Arbeitsräumen -  
dargestellt am Fallbeispiel  
Flugzeugabfertigung eines Großflughafens  
1990
- SACK, W.  
Prozessüberwachung des Bohrvorganges  
durch Vorschubkraftmessung  
1978
- SCHMID, E.  
Theoretische und experimentelle  
Untersuchung des Mechanismus der  
Drehmomentübertragung der Kegel-Preß-  
Verbindung  
1968
- SCHNAUBER, H.  
Erhaltung der Bewegungsenergie  
gebremster Schwungmassen mit  
menschlicher Muskelkraft  
1969
- SCHNEIDER, W.  
Beanspruchung und Haltbarkeit  
hochvorgespannter  
Schraubenverbindungen  
1992
- SCHOTT, R.  
Experimentelle Untersuchung der Struktur  
von Gelenkbewegungen im  
Bewegungsraum der Arme, des ganzen  
Körpers und Darstellung in einem  
menschbezogenen Grundsystem  
1971
- SEIBERT, W.  
Über den Einfluß der Radaufhängung  
einachsiger Pkw-Anhänger-Züge,  
dargestellt am Beispiel des Caravan  
1982
- SPÄHN, R.  
Elektrochemische Untersuchung von  
Schädigungsmechanismen bei  
Schwingungsrißkorrosion im stabil  
passiven Zustand - Anrißfrüherkennung  
und Beschreibung der von Rißentstehung  
und Rißfortschritt  
1989
- STEIN, K.  
Die Gefügeausbildung und ihr Einfluß auf  
die mechanischen Eigenschaften der  
Nickelbasislegierung IN 738 LC in  
Abhängigkeit von gießtechnischer  
Erzeugung und Nachbehandlung  
1983
- WAGNER, G. H.  
Moderne Verfahren zur Prüfung der  
Rißbildung durch Komplexbeanspruchung  
bei höheren Temperaturen und Drücken im  
Hinblick auf den industriellen  
Werkstoffeinsatz  
1990
- WALLER, H.  
Einfluß des physikalischen und  
chemischen Werkstoffzustandes auf die  
Vergleichbarkeit von Basiskennwerten für  
Duroplaste und hochtemperaturbeständige  
Thermoplaste  
1992





# **Verzeichnis der bisherigen Veröffentlichungen des Fachgebiets Maschinenelemente und Mechanik**

- BINZ, H.: Verschleißuntersuchungen an Rollenketten.  
Maschinenelemente-Kolloquium '82, Band 21 der Schriftenreihe Wissenschaft und Technik, S. 223 - 231, Darmstadt: THD 1983.
- DÖRSAM, E.: Die Kette - ein Relikt der Vergangenheit oder ein modernes Maschinenelement?  
Festschrift 25 Jahre Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik, S. 60 - 75,  
Darmstadt: THD 1991.
- GRÖSSER, H.: Von der tabellarischen Lösungssammlung zur wissensbasierten  
Konstruktionsunterstützung - Aktuelle Konstruktionsforschung am Fachgebiet  
Maschinenelemente und Mechanik vor dem Hintergrund 25-jähriger  
Forschungsaktivität.  
Festschrift 25 Jahre Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik,  
S. 20 - 36, Darmstadt: THD 1991.
- HAIN, J.: Rechneinsatz in der Konstruktion - Eine kritische Betrachtung. Der Konstrukteur  
24 (1993) 4, S. 62.
- LANGER, H. P.: Reibung, Verformung und Schlupf von Flachriemen Teil I. Antriebstechnik  
16 (1977) 2, S. 63 - 69.
- LANGER, H. P.: Reibung, Verformung und Schlupf von Flachriemen Teil II. Antriebstechnik  
16 (1977) 5, S. 293 - 295.
- LANGER, H. P. u. W. MOCKER: Requiem für Opas Riementrieb? Bericht über  
Neuentwicklungen reibschlüssiger Getriebe. Antreiben Steuern Regeln (1976) 11,  
S. 31 - 36.
- NEUDÖRFER, A.: Systematischer Katalog für Bedienteile.  
Werkstatt und Betrieb, 110 (1977) 4, S. 225 - 236.
- NEUDÖRFER, A.: Einsatz der Metaplantchnik in der Sicherheitstechnik.  
Die Berufsgenossenschaft (1992) 4, S. 232 - 235.
- NEUDÖRFER, A.: Gefahrenermittlung im Rahmen des sicherheitsgerechten Konstruierens.  
Tagungsbericht Tb 60: Erkennen und Beurteilen von Gefährdungen bei der Arbeit.  
Vorträge der Fachtagung am 23. und 24. März 1993 in Dortmund, Schriftenreihe der  
BAU, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag 1993.
- NEUDÖRFER, A. u. A. BOEHME: Anwendung ergonomischer Erkenntnisse bei der Entwicklung  
technischer Erzeugnisse. Maschinenelemente-Kolloquium '82, Band 21 der  
Schriftenreihe Wissenschaft und Technik, S. 252 - 261, Darmstadt: THD 1983.
- NEUDÖRFER, A. u. W. VOOS: Patentanalyse, systematisch durchgeführt am Beispiel von  
Sicherheitsskibindungen. Feinwerktechnik und Meßtechnik 85 (1977), S. 385 - 392.

- PERSEKE, W.: Optimierung der Kerbwirkung konstruktiv bedingter Mehrfachkerben an Wellen. Maschinenelemente-Kolloquium '82, Band 21 der Schriftenreihe Wissenschaft und Technik, S. 210 - 218, Darmstadt: THD 1983.
- RAAB W.: Spannungsoptische Untersuchungen als Hilfsmittel im Maschinenbau. Technica (1964) 12.
- RAAB W.: Spannungsoptische Untersuchungen als Hilfsmittel im Maschinenbau. Technica (1964) 13.
- RAAB W.: Spannungsoptische Untersuchungen. Handbuch der Mikroskopie in der Technik, S. 109 - 134, Frankfurt/M.: Umschau Verlag 1975.
- RAAB, W.: Forschungsvorhaben am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik. Maschinenelemente-Kolloquium '82, Band 21 der Schriftenreihe Wissenschaft und Technik, S. 207 - 209, Darmstadt: THD 1983.
- RAAB, W.: 25 Jahre Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik. Festschrift 25 Jahre Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik, S. 12 - 19, Darmstadt: THD 1991.
- RAAB, W. u. H. BINZ: Drehmoment- und Drehzahlmessung an einem Kettenprüfstand. Meßtechnische Briefe 20 (1984) 2, S. 35 - 40.
- RAAB, W. u. H. BINZ: Neue Erkenntnisse zum Einlaufverhalten von Rollenkettengetrieben. Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Rostock, N-Reihe, 36 (1987) 5, S. 28 - 32.
- RAAB, W., E. DÖRSAM u. M. KRAUS: Lebensdauer von Rollenketten erhöhen mit konstruktiven und tribologischen Maßnahmen. Maschinenmarkt 98 (1992) 47, S. 58 - 63.
- RAAB, W. u. H. GRÖSSER: Rechnerunterstützung in der Konstruktion - Ergebnisse einer Umfrage unter deutschen Maschinenbau-Unternehmen. Festschrift "Gerhard Pahl", Darmstadt: THD 1990.
- RAAB, W. u. H. P. LANGER: Probleme bei der Konstruktion und Möglichkeiten der Weiterentwicklung von Flachriementrieben. Werkstatt und Betrieb 106 (1973) 2, S. 75 - 82.
- RAAB, W. u. W. MOCKER: Bericht zum DFG-Forschungsvorhaben "Steigerung der Raumleistung von Riementrieben", Darmstadt: THD 1982.
- RAAB, W. u. C. PAWLIK: Maßnahmen zur Beeinflussung des Verschleißverhaltens von Rollenketten. Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Rostock, N-Reihe, 39 (1990) 6, S. 167 - 171.
- RAAB W. u. W. PERSEKE: Übertragbarkeit spannungsanalytisch gewonnener Ergebnisse auf das Verhalten von Bauteilen unter dynamischer Beanspruchung. VDI-Berichte Nr. 480, Düsseldorf: VDI-Verlag 1983.
- RAAB, W., A. RENNEISEN u. M. WEIGAND: Die Beanspruchung von Paßfedern, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Heft 317 (1990), Frankfurt a. M.

- RAAB, W. u. J. SCHNEIDER: Gliederungssystematik für getriebetechnische Konstruktionskataloge. Antriebstechnik 21 (1982) 12, S. 603 - 606.
- RAAB W., M. WEIGAND u. V. GÜNTHER: Beanspruchung in Paßfederverbindungen. Teil I. Antriebstechnik 31 (1992) 6, S. 69 - 73.
- RAAB W., M. WEIGAND u. V. GÜNTHER: Beanspruchung in Paßfederverbindungen. Teil II. Antriebstechnik 31 (1992) 7, S. 55 - 59.
- RAAB W., M. WEIGAND, A. RENNEISEN u. S. HÖRL: Modelling Technique to Simulate Thermally-Induced Stress in an Assembly Consisting of Components made of Different Materials. Experimental Techniques 40 (1991) May/June, p. 38 - 43.
- RAAB, W. u. R. ZANG: Anwendung des Achsenbildverfahrens bei der Untersuchung von Paßfederverbindungen. VDI-Berichte Nr. 631, S. 259 - 274, Düsseldorf: VDI-Verlag 1987.
- RAAB, W. u. R. ZANG: Beanspruchung in der Welle einer Paßfederverbindung bei statischer und dynamischer Torsionsbelastung. Vorträge bei der 12. Sitzung des Arbeitskreises Betriebssicherheit, Deutscher Verband für Materialprüfung e.V. Berlin (1987), S. 71 - 81.
- RENNEISEN, A.: Die Beanspruchungen von genuteten Wellen und Paßfederverbindungen - Untersuchungsmethoden und Ergebnisse. Festschrift 25 Jahre Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik, S. 12 - 19, Darmstadt: THD 1991.
- SCHNEIDER, J.: Einsatzmöglichkeiten von Konstruktionskatalogen in der Antriebstechnik. Maschinenelemente-Kolloquium '82, Band 21 der Schriftenreihe Wissenschaft und Technik, S. 241 - 251, THD 1983.
- UHRIG, O.: Optimierung hochbeanspruchter Schutzrohre für Widerstandsthermometer und Thermoelemente. Maschinenelemente-Kolloquium '82, Band 21 der Schriftenreihe Wissenschaft und Technik, S. 232 - 240, Darmstadt: THD 1983.
- UHRIG, O.: Beitrag zur Berechnung und Gestaltung von hochbeanspruchten Schutzrohren für Widerstandsthermometer und Thermoelemente. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr.82., Düsseldorf: VDI-Verlag 1981.
- ZANG, R.: Einfluß von formschlüssigen Kraftübertragungselementen auf die Kerbwirkung an Bauteilen, dargestellt am Beispiel der Paßfederverbindung. Maschinenelemente-Kolloquium '82, Band 21 der Schriftenreihe Wissenschaft und Technik, S. 219 - 222, Darmstadt: THD 1983.



# **Verzeichnis der bisher am Fachgebiet Maschinenelemente und Mechanik erstellten Studien- und Diplomarbeiten (Stand: März 1994)**

ALBECK, DIETER

Studienarbeit: Entwicklung eines  
aufliegenden Türschließers  
Jahr: 1978 Betreuer: VOOS

ALLERS, MATTHIAS

Studienarbeit: Messung des Buchsen-  
/Bolzenverschleißes unterschiedlich  
oberflächenbehandelter Rollenketten  
Jahr: 1991 Betreuer: Pawlik

ALLERSMEIER, BERND

Studienarbeit: Erprobung einer  
systematischen Zusammenstellung von  
Maschinenelementen beim Entwerfen  
Jahr: 1971 Betreuer: EWALD

ANDRAE, JÜRGEN

Diplomarbeit: Berechnungen der  
Spannungen und Verformungen von  
Rollenkettenbauteilen mit der Methode der  
Finiten Elemente  
Jahr: 1984 Betreuer: BINZ/LEIDICH

ARIN, HAKAN

Studienarbeit: Konstruktion eines  
Verspannungsprüfstandes für  
Umlaufbiegeversuche-Nabe-Verbindungen  
mit überlagerter statischer Torsion  
Jahr: 1990 Betreuer: WEIGAND

ARNOLD, GREGOR

Studienarbeit: Spannungsoptische  
Untersuchungen an biegebelasteten  
Paßfederverbindungen  
Jahr: 1990 Betreuer: WEIGAND

AUGUSTIN, RALF

Studienarbeit: Rechnerunterstützung in der  
Konstruktion - Auswertung einer Umfrage  
unter deutschen Maschinenbau-  
Unternehmen  
Jahr: 1991 Betreuer: GRÖSSER

AYAZ, MAHMUT

Studienarbeit:  
Raumleistungsuntersuchungen an  
verschiedenen Getriebebauarten  
Jahr: 1979 Betreuer: MOCKER

BACHMANN, MATTHIAS

Studienarbeit: Einführung des CAD-  
Systems "MicroCADDs Personal Designer  
am Fachgebiet Maschinenelemente und  
Mechanik  
Jahr: 1989 Betreuer: WEIGAND/GRÖSSER

BÄHR, GERHARD

Studienarbeit: Erprobung und  
Weiterentwicklung eines Meßverfahrens  
zur Bestimmung des örtlichen Schlupfes  
Jahr: 1975 Betreuer: LANGER/PROF.  
Buschmann

BAIER, JOACHIM

Studienarbeit: Erstellen eines  
Konstruktionskataloges für  
Energiespeicher  
Jahr: 1984 Betreuer: SCHNEIDER

BARTH, JENS

Studienarbeit: Verhalten des Menschen in  
technischen Systemen  
Jahr: 1993 Betreuer: NEUDÖRFER

BAUER, MICHAEL

Diplomarbeit: Planung der  
Schwingfestigkeitsprüfung von  
Paßfederverbindungen

Jahr: 1989 Betreuer: WEIGAND

BAUER, CHRISTIAN

Diplomarbeit: Spannungsanalytische  
Untersuchungen an Paßfederverbindungen

Jahr: 1992 Betreuer: RENNEISEN

BÄUMEL, HELMUT

Studienarbeit: Entwurf einer  
Schlagbohrmaschine

Jahr: 1983 Betreuer: SCHNEIDER

BAUMGARTEN, HEINZ-OTTO

Studienarbeit: Entwurf einer Pkw-  
Anhänger-Baureihe in punktgeschweißter  
Ausführung

Jahr: 1971 Betreuer: LANGER

BAURMANN, ARMIN

Studienarbeit: Untersuchungen zur  
Erweiterung und Modifikation des  
Rechnerprogramms SCHRAUBE zur  
Berechnung von Schraubenverbindungen

Jahr: 1990 Betreuer: GRÖSSER

BECHTEL, JONATHAN

Studienarbeit: Entwicklung eines Konzepts  
zur rechnergestützten Berechnung von  
Maschinenelementen und Implementierung  
eines existierenden Programms zur  
Wellen-Träger-Berechnung

Jahr: 1993 Betreuer: DÖRSAM/FABRIG

BECK, ERHARD

Studienarbeit: Untersuchungen zur  
Kerbwirkung an den Mehrfachkerben  
Paßfedernut-Sicherungsringnut und  
Paßfedernut-Wellenabsatz

Jahr: 1983 Betreuer: PERSEKE

BECKER, WOLFGANG

Diplomarbeit: Spannungsoptische  
Untersuchungen an einem ebenen Modell  
einer Paßfederverbindung

Jahr: 1984 Betreuer: ZANG

BECKER, WOLFGANG

Studienarbeit: Durch eine Befragung von  
MB-Studenten soll ermittelt werden,  
welche Vor- und Nachteile eine am Institut  
neu entwickelte Darstellungsart gegenüber  
der zur Zeit genormten Darstellungsart für  
Entwürfe aufweist

Jahr: 1974 Betreuer: LÜPERTZ

BEHRNDT, ROLF

Studienarbeit: Entwicklung und  
Überprüfung von Lösungskonzepten für  
einen Simulationsprüfstand für  
Verschleißuntersuchungen an  
Rollenkettengliedern

Jahr: 1982 Betreuer: BINZ

BENZING, GERD-DIETER

Diplomarbeit: Raumleistung als Kriterium  
zur Bewertung von Getrieben

Jahr: 1979 Betreuer: MOCKER

BERGER, HARALD

Studienarbeit: Spannungsoptische  
Untersuchungen an  
Querschnittsübergängen von Wellen

Jahr: 1987 Betreuer: WEIGAND

BETH, MATTHIAS

Studienarbeit: Konstruktion eines  
Kleinstmengendosierers für Schüttgüter

Jahr: 1987 Betreuer: BINZ

BEYER, RAINER

Studienarbeit: Weiterentwicklung einer  
Meßeinrichtung zur Messung der Teilung  
von Rollenketten

Jahr: 1993 Betreuer: DÖRSAM

BIEMER, ERNST

Studienarbeit: Erst. von techn.  
Zeichnungen auf numerisch gesteuerten  
Zeichenmasch. / Erkundung der  
Programmierung auf dem Markt  
befindlicher Zeichenmasch. / Kritische  
Beurteilung im Hinblick auf Erstellung von  
techn. Zeichnungen für den Maschinenbau  
Jahr: 1971 Betreuer: LÜPERTZ

BIESOLD, WOLFGANG

Diplomarbeit: Konstruktion eines  
Kettenprüfstandes mit mechanischer  
Leistungsrückführung  
Jahr: 1988 Betreuer: PAWLIK

BINZ, HANSGEORG

Studienarbeit: Konstruktion einer  
Ballwurfmaschine für Tennisspieler  
Jahr: 1979 Betreuer:  
SLEDZIEJOWSKI/UNLAND

BITZ, GERD

Studienarbeit: Weiterentwicklung  
bekannter Verfahren zur Herstellung von  
Halbzeugen sowie fertiger Modelle für  
spannungsoptische Untersuchungen  
Jahr: 1982 Betreuer: PERSEKE

BLÜMMEL, GERHARD

Studienarbeit: Systematischer Katalog für  
Informationsquellen  
Jahr: 1977 Betreuer: NEUDÖRFER

BÖHM, VOLKER

Wissenschaftliche Hausarbeit:  
Überarbeitung eines Programms zur  
Berechnung von zylindrischen  
Schraubendruckfedern  
Jahr: 1992 Betreuer: DÖRSAM

BOLZA-SCHÜNEMANN, Albrecht

Studienarbeit: Entwicklung einer  
Skibindung (Plattenbindung mit seitlicher  
Halterung)  
Jahr: 1976 Betreuer: MAYER

BRAND, MICHAEL

Studienarbeit: Entwurf einer  
Versuchseinrichtung zur Auswertung  
spannungsoptischer Modellschnitte mit  
dem Verfahren der Schiefen  
Durchstrahlung  
Jahr: 1992 Betreuer: GÜNTHER

BRANDT, JÜRGEN

Studienarbeit: Erstellung eines  
Baukastensystems  
Industrieroboterperipherie  
Jahr: 1988 Betreuer: PAWLIK

BRAUER, MARTIN

Studienarbeit: Konstruktive Maßnahmen  
zur Vermeidung von Störungen beim  
Einlaufen der Rollenketten ins Kettenrad  
Jahr: 1990 Betreuer: DÖRSAM

BRINKROLF, HEINRICH

Studienarbeit: Begriffe und Definitionen in  
der Sicherheitstechnik  
Jahr: 1975 Betreuer: MAYER

BUCHHOLZ, KARL-Heinz

Studienarbeit: Anwendung tabellarischer  
Lösungssammlungen beim Konstruieren  
Jahr: 1975 Betreuer: EWALD

BULLERSCHEN, BERT

Studienarbeit: Ermittlung der  
Anforderungen an eine firmeninterne  
Software zur Teileklassifizierung mit  
anschließender Programmgestaltung und -  
erprobung  
Jahr: 1989 Betreuer: GRÖSSER

CAESAR, BERND

Studienarbeit: Entwicklung einer  
Prüfmaschine zur Ermittlung der  
Dauerfestigkeit von Wellen bei  
zusammengesetzter  
Wechselbeanspruchung  
Jahr: 1972 Betreuer: LÜPERTZ

CHRISTMANN, RAINER

Studienarbeit: Zusammenhang zwischen Belastbarkeit des menschlichen Beines und dem Auslöseverhalten einer Skibindung aus der Sicht des Ingenieurs  
Jahr: 1980 Betreuer: VOOS

DEMEL, WOLFGANG

Diplomarbeit: Erhöhung der Lebensdauer von Rollenketten durch Oberflächenbehandlung  
Jahr: 1986 Betreuer: PAWLIK

DEPPE, FRANK

Studienarbeit: Erprobung eines Riemenprüfstandes  
Jahr: 1974 Betreuer: LANGER

DEPROSSE, HARALD

Diplomarbeit: Ermittlung von Einflußfaktoren auf die Organisation (Aufbau- und Ablauforganisation) der Konstruktion und Erarbeitung eines Konzeptes zur Wahl einer geeigneten Organisationsform  
Jahr: 1992 Betreuer: HAIN

DEUTSCHER, OSWALD

Studienarbeit: Messung des örtlichen Schlupfes von Flachriemen  
Jahr: 1974 Betreuer: LANGER

DEY, HANS-Joachim

Studienarbeit: Entwurf eines Wandarmbaukastensystems unter besonderer Berücksichtigung des Gewichtsausgleichs  
Jahr: 1980 Betreuer: PERSEKE/UNLAND

DICK, ROMAN

Diplomarbeit: Spannungsanalyse an Paßfederverbindungen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente  
Jahr: 1991 Betreuer: RENNEISEN

DIETZ, GEORG

Diplomarbeit: Konzeption einer Vorrichtung zum Verfüllen kleinster Partikel  
Jahr: 1989 Betreuer: PROF. RAAB/ROGLER

DIETZ, WOLFGANG

Studienarbeit: Recherche über Untersuchungen an Rollenketten, insbesondere bezüglich Wirkungsgrad, Verschleiß und Lebensdauer  
Jahr: 1982 Betreuer: BINZ

DIOSI, GABOR

Diplomarbeit: Erstellung eines Lösungskataloges für mechanische Huberzeuger  
Jahr: 1982 Betreuer: SCHNEIDER

DISSER, ROLAND

Diplomarbeit: Erstellung eines Konstruktionskataloges für Kupplungen  
Jahr: 1983 Betreuer: SCHNEIDER

DÖRSAM, EDGAR

Studienarbeit: Entwicklung eines Abdichtsystems zur Begrenzung von Flüssigkeiten auf den Haarbereich am menschlichen Kopf  
Jahr: 1988 Betreuer: ROGLER

DREIBHOLZ, DIETER

Studienarbeit: Entwicklung einer symbolischen Darstellungsweise für mechanische Getriebe  
Jahr: 1969 Betreuer: LÜPERTZ

EBERLE, FRANZ

Studienarbeit: Erstellung eines Konstruktionskataloges für mechanische Lineargetriebe  
Jahr: 1984 Betreuer: SCHNEIDER



ECKEL, MARKUS

Studienarbeit: Verbesserung des  
Bogentransportsystems in einer  
Druckmaschine

Jahr: 1993 Betreuer: DÖRSAM/HAIN

EHRHARDT, HARALD

Wissenschaftliche Hausarbeit:  
Entwicklung und Implementierung eines  
Konzepts für eine Werkstoffdatenbank

Jahr: 1993 Betreuer: DÖRSAM

EICK, IVO

Wissenschaftliche Hausarbeit:  
Entwicklung und Implementierung eines  
Lastmomentkonzeptes für einen Zweirad-  
Kettenprüfstand durch einen Generator mit  
Leistungsrückkopplung

Jahr: 1993 Betreuer: KRAUS

EISENBACH, BERND

Studienarbeit: Untersuchung einer neu  
vorgestellten Wellen-Naben-Verbindung  
mit verschiedenen ausgeführten  
elliptischen Mitnehmern

Jahr: 1981 Betreuer: PERSEKE

EISER, ARMIN

Studienarbeit: Konstruktion eines  
aufliegenden Türschliessers mit  
elektrischem Antrieb

Jahr: 1982 Betreuer: SCHNEIDER

ENGEL, ANDREAS

Studienarbeit: Aufzeigen technischer und  
logistischer Entwicklungstrends für  
Druckmaschinen unter Berücksichtigung  
von Analogien zur Werkzeugmaschinen-  
Branche

Jahr: 1990 Betreuer: GRÖSSER

ENGELKAMP, KAI

Wissenschaftliche Hausarbeit:  
Entwicklung von Lernzielen Mechanik I  
und II

Jahr: 1992 Betreuer: NEUDÖRFER

ESSER, CHRISTOPH

Studienarbeit: Entwicklung einer  
Skischuh- und  
Sicherheitsbindungskombination mit  
Ballengelenk für den alpinen Skilauf

Jahr: 1981 Betreuer: VOOS

FABRIG, PETER

Diplomarbeit: Entwicklung des Konzepts  
eines rechnergestützten Analyse- und  
Dokumentationssystems für die Ermittlung  
von Produktanforderungen

Jahr: 1991 Betreuer: GRÖSSER

FAUPEL, BERND

Studienarbeit: Systematische Suche nach  
Abdichtsystemen

Jahr: 1985 Betreuer: ROGLER

FELLMANN, HOLGER

Studienarbeit: Spannungsoptische  
Untersuchungen an Augenstäben

Jahr: 1984 Betreuer: ZANG

FISLAKE, MARTIN

Wissenschaftliche Hausarbeit:  
Systematische Darstellung des Wissens  
über formschlüssige Verbindungen im  
Rahmen einer methodischen Betrachtung  
der Maschinenelemente

Jahr: 1990 Betreuer: DÖRSAM

FLECHSEL, WOLFGANG

Studienarbeit: Experimentelle  
Untersuchungen an Hülltrieben

Jahr: 1983 Betreuer: MOCKER

FRANK, WIELAND

Studienarbeit: Erstellen einer  
Anforderungsliste für die Neuentwicklung  
eines Bodenstativs

Jahr: 1984 Betreuer: ZANG

FREDE, CONRAD

Studienarbeit: Berücksichtigung ergonomischer Anforderungen bei der Gestaltung technischer Produkte und Systeme in der industriellen Praxis - Analyse der Vorgehensweis und der eingesetzten Hilfsmittel

Jahr: 1987 Betreuer: GUTBERLET

FREDE, CONRAD

Diplomarbeit: Bestimmung und Konkretisierung ergonomischer Anforderungen an Technische Systeme

Jahr: 1988 Betreuer: GUTBERLET

FREUND, HERMANN

Diplomarbeit: Untersuchung der verschiedenen Dokumentationsverfahren auf ihre Eignung zur inhaltserschließenden Dokumentation von Patenten

Jahr: 1979 Betreuer: VOOS

FRIEDRICH, RICHARD

Wissenschaftliche Hausarbeit: Untersuchungen zum Einfluß von spezifischer Flächenpressung und Gleitgeschwindigkeit im Kettengelenk auf das Verschleißverhalten von Rollenkettengetrieben

Jahr: 1986 Betreuer: RAAB/PAWLIK

FUCHS, HANS-Herbert

Studienarbeit: Systematischer Katalog der Anzeigeelemente

Jahr: 1979 Betreuer: NEUDÖRFER

GABER, VOLKER

Diplomarbeit: Erstellung eines Rechnerprogramms zur Ermittlung der Formzahlen für Torsion an rotationssymmetrischen Wellen

Jahr: 1983 Betreuer: ZANG

GABRIEL, WOLFGANG

Studienarbeit: Experimentelle Bestimmung des Leistungsverzweigungsverhältnisses am Spreizrollentrieb

Jahr: 1983 Betreuer: MOCKER

GARTHE, PETER

Diplomarbeit: Spannungsoptische Untersuchungen an Lasteinleitungsstellen

Jahr: 1983 Betreuer: ZANG

GABMANN, STEFAN

Studienarbeit: Entwicklung eines Elektronaglers

Jahr: 1984 Betreuer: SCHNEIDER

GEISLER, GERD

Studienarbeit: Prüfstand für Flachriemen

Jahr: 1974 Betreuer: LANGER

GEIB, MANFRED

Studienarbeit: Lösungskatalog der geschützten Flach- und Keilriemen

Jahr: 1979 Betreuer: MOCKER

GERBIG, DIETER

Diplomarbeit: Untersuchungen von Möglichkeiten der Dokumentation von Patentansprüchen zur Erarbeitung eines auch vom Konstruktionsbereich nutzbaren Patentinformationssystems auf der Basis tabellarischer Lösungssammlungen

Jahr: 1979 Betreuer: VOOS

GERNHARDT, DIRK

Studienarbeit: Analyse und Aufbereitung konstruktiver Lösungsprinzipien zur Realisierung ergonomischer Anforderungen

Jahr: 1989 Betreuer: GUTBERLET

GERNHARDT, DIRK

Studienarbeit: Analyse und Aufbereitung konstruktiver Lösungsprinzipien zur Realisierung ergonomischer Anforderungen

Jahr: 1989 Betreuer: GUTBERLET

GIRNUS, HERMANN

Studienarbeit: Optimierung einer konstruktiven Mehrfachkerbe am Maschinenelement Welle  
Jahr: 1983 Betreuer: PERSEKE

GOLDBACH, ULRICH

Wissenschaftliche Hausarbeit: Spannungsoptische Untersuchungen an Paßfederverbindungen  
Jahr: 1984 Betreuer: PROF. RAAB/ZANG

GOTTHARDT, MICHAEL

Studienarbeit: Wirkungsgradmessungen an Schmalkeilriemen  
Jahr: 1980 Betreuer: MOCKER

GOTTSCHLING, HANS

Studienarbeit: Konstruktion einer Belastungsvorrichtung für die Durchführung spannungsoptischer Versuche an Paßfederverbindungen  
Jahr: 1988 Betreuer: WEIGAND

GÖTZ, THOMAS

Studienarbeit: Auswahl und Implementierung von mathematischen Methoden als Beitrag zur Entwicklung eines Programmsystems zur kinematischen Analyse eines Ketten-Greiferwagensystems  
Jahr: 1991 Betreuer: DÖRSAM

GRÄBER, STEFAN

Studienarbeit: Weiterentwicklung einer Meßeinrichtung zur Messung der Teilung von Rollenketten  
Jahr: 1993 Betreuer: DÖRSAM

GREBNER, RAINER

Studienarbeit: Neukonzeption eines technischen Systems zur Auftrennung von Stoffgemischen unter Verwendung des Prinzips der Chromatographie  
Jahr: 1994 Betreuer: HAIN/FABRIG

GREHN, MARTIN

Studienarbeit: Konstruktion eines Kettentriebprüfstandes  
Jahr: 1979 Betreuer: MOCKER/UNLAND

GREIL, CLAUS

Studienarbeit: Recherchieren und Ordnen der Fachliteratur aus dem Themenkreis Information/Dokumentation im technisch-naturwissenschaftlichen Bereich  
Jahr: 1979 Betreuer: VOOS

GRÖSSER, HORST

Studienarbeit: Rechenprogramme zur Berechnung elastischer zylindrischer Preßverbindungen und zentrisch oder exzentrisch verspannter Ein- und Mehrschraubenverbindungen  
Jahr: 1985 Betreuer: BINZ

GRÖSSER, HORST

Diplomarbeit: Einsatz einer Analyseverfahren zur systematischen Ermittlung ergonomischer Schwachstellen in Wirksystemen am Beispiel von Bogenoffset-Druckmaschinen  
Jahr: 1986 Betreuer: BOEHME

GÜNTHER, VOLKER

Diplomarbeit: Ebene spannungsoptische Untersuchungen zur Wirkung von Einschlüssen verschiedener Geometrien und E-Moduli auf die Werkstoffbeanspruchung  
Jahr: 1990 Betreuer: WEIGAND/RENNEISEN

GUTBERLET, THOMAS

Diplomarbeit: Untersuchung vorhandener Mängellisten aufbauend auf Arbeitssystem-Analysen mit dem Ziel, Schwachstellen herauszufiltern, die im Verantwortungsbereich des Konstrukteurs liegen  
Jahr: 1985 Betreuer: BOEHME

GUTHEIL, PETER

Diplomarbeit: Untersuchungen zur Entwurfs- bzw. Gestaltungsphase des Konstruktionsprozesses im Hinblick auf die äußere Formgebung von Industrieprodukten  
Jahr: 1988 Betreuer: GRÖSSER

GYMNICH (VON), VOLKER

Studienarbeit: Untersuchungen zu dem in der Spannungsoptik für Auswertungen räumlicher Versuche eingesetzten Verfahren der Isochromatenvervielfachung  
Jahr: 1990 Betreuer: RENNEISEN

HACKELBÖRGER, HARALD

Studienarbeit: Erweiterung eines Hochgeschwindigkeitsprüfstandes für Flachriemen  
Jahr: 1981 Betreuer: MOCKER

HAHNEL, BERNHARD

Wissenschaftliche Hausarbeit: Rechnergestütztes Programm für den Mohr'schen Spannungskreis  
Jahr: 1993 Betreuer: NEUDÖRFER

HAIN, JOHANNES

Diplomarbeit: Analyse des Handlungssystems Anforderungsermittlung in der Produktplanung und -entwicklung  
Jahr: 1990 Betreuer: GRÖSSER

HARTMANN, GUIDO

Studienarbeit: Entwicklung von Grundlagen für ein rechnergestütztes Informationssystem allgemeiner und fachspezifischer methodischer Hilfsmittel (Methodenbank)  
Jahr: 1990 Betreuer: GRÖSSER

HASCHKE, RAINER

Diplomarbeit: Systematische Erfassung der Schnittstellen des Menschen mit einem Personenkraftwagen  
Jahr: 1979 Betreuer: NEUDÖRFER

HAUFE, WILFRIED

Studienarbeit: Untersuchungen zur Kerbwirkung an den Mehrfachkerben Paßfedernut-Sicherungsringnut und Paßfedernut-Wellenabsatz  
Jahr: 1983 Betreuer: PERSEKE

HEIDEL, BERND

Studienarbeit: Messung des örtlichen Schlupfes am Flachriemen  
Jahr: 1973 Betreuer: PROF. BUSCHMANN/LANGER

HEINBACH, HARALD

Studienarbeit: Theoretische Untersuchungen zur Optimierung des Preßverbandes Buchse-Innenlasche von Rollenketten  
Jahr: 1985 Betreuer: BINZ

HEINMÜLLER, CHRISTIAN

Diplomarbeit: Spannungsoptische Untersuchungen an Biegebalken mit Bohrung  
Jahr: 1983 Betreuer: ZANG

HELD, JÜRGEN

Studienarbeit: Konzeption und Konstruktion eines Druckerzeugers zum Einsatz im kosmetischen Bereich  
Jahr: 1993 Betreuer: HAIN

HELLER, MATHIAS

Studienarbeit: Ebene spannungsoptische Untersuchungen an einer mehrteiligen Klemmverbindung mit geschlitzter Nabe  
Jahr: 1992 Betreuer: GÜNTHER

HENNINGS, LEIF

Studienarbeit: Abriß der historischen Entwicklung zur modernen technischen Zeichnung des Maschinenbaus / Zusammenstellung von Änderungsvorschlägen dazu aus der modernen Literatur  
Jahr: 1973 Betreuer: LÜPERTZ

HENTZE, THOMAS

Studienarbeit: Anwendungen von  
Zuverlässigkeitstheorien auf  
Schutzsysteme

Jahr: 1978 Betreuer: MAYER

HERBENER, RAINER

Diplomarbeit: Methodisches Erarbeiten der  
Anforderungen an ein  
Patentinformationssystem aus der Sicht des  
Patentingenieurs

Jahr: 1980 Betreuer: VOOS

HERBIG, THOMAS

Studienarbeit: Entwicklung und  
Konstruktion eines Tragarmes für Lasten  
von 15kg bis 32kg

Jahr: 1993 Betreuer: FABRIG

HICKETHIER, HEIKO

Studienarbeit: Erstellung eines  
Lösungskataloges der reibschlüssigen  
Getriebe

Jahr: 1981 Betreuer: MOCKER

HINKELMANN, HORST

Studienarbeit: Konstruktion einer  
Laufschieneneinheit und einer  
Neigungsverstellung für  
Bildschirmträgersysteme

Jahr: 1987 Betreuer: ROGLER

HOEFELICH, MICHAEL

Studienarbeit: Spannungsoptische  
Untersuchungen eines Nutkeiles

Jahr: 1989 Betreuer:  
WEIGAND/RENNEISEN

HOFFMANN, HARTMUT

Studienarbeit: Konstruktion einer  
Kettenprüfeinrichtung

Jahr: 1982 Betreuer: BINZ

HOFMANN, MARKUS

Diplomarbeit: Erarbeitung eines Konzeptes  
zur Entwicklung von integrierten  
Kosteninformationssystemen zur  
Unterstützung des Konstruktionsprozesses

Jahr: 1993 Betreuer: FABRIG

HOFSTÖTTER, ANDREAS

Studienarbeit: Programmpaket zur  
Simulation eines Ketteneinlaufs

Jahr: 1993 Betreuer: DÖRSAM

HOPPE, WOLFG.-EBERHARD

Studienarbeit: Prinzipielle Entwicklung  
einer Prüfmaschine zur Ermittlung der  
Dauerfestigkeit von Wellen bei  
zusammengesetzter Beanspruchung

Jahr: 1969 Betreuer: LÜPERTZ/MAYER

HÖRL, STEFAN

Diplomarbeit: Modellwerkstoffe und  
Modelltechnik bei spannungsoptischen  
Untersuchungen temperaturbedingter  
mechanischer Beanspruchungen der  
Zylinderköpfe von Verbrennungsmotoren

Jahr: 1989 Betreuer:

RENNEISEN/WEIGAND

HORNISCHER, LUTZ

Studienarbeit: Erarbeiten eines Konzeptes  
zur rechnerunterstützten Teileauswahl im  
Konstruktionsbereich

Jahr: 1989 Betreuer: GUTBERLET

HÜLLER, WINFRIED

Diplomarbeit: Technologische Grenzen für  
die Anwendung der Ähnlichkeitsgesetze

Jahr: 1976 Betreuer: MAYER

HUMMEL, THOMAS

Studienarbeit: Erstellen eines  
Konstruktionskataloges für bewegte  
Berührungsdichtungen

Jahr: 1985 Betreuer: ROGLER

IRLE, JOST-HEINRICH

Studienarbeit: Entwicklung einer  
Meßeinrichtung zur Messung der Teilung  
von Rollenketten

Jahr: 1991 Betreuer: DÖRSAM

JAKUBASCHKE, GERWIN

Studienarbeit: Entwicklung eines  
Studiosystems

Jahr: 1977 Betreuer: MAYER

JANETZKY, BJÖRN

Studienarbeit: Konstruktion eines  
Einzelgelenkprüfstandes

Jahr: 1993 Betreuer: KRAUS

JANKOW, ROLF

Diplomarbeit: Erstellen des Gliederungs-  
und Hauptteils eines  
Konstruktionskataloges für  
hydraulische/pneumatische Pumpen und  
Motoren

Jahr: 1983 Betreuer: SCHNEIDER

JENNERT, THOMAS

Studienarbeit: Spannungsoptische  
Untersuchungen an torsionsbelasteten  
Paßfederverbindungen

Jahr: 1990 Betreuer: WEIGAND

JEBBERGER, GERHARD

Studienarbeit: Konstruktion eines  
Kettentriebprüfstandes

Jahr: 1979 Betreuer: MOCKER/UNLAND

JOUSEFZADEH, ATTILA

Diplomarbeit: Konzeption und partielle  
Realisierung eines wissensbasierten  
Systems zur Verkaufsunterstützung von  
Muldenkippern

Jahr: 1990 Betreuer: GUTBERLET

JÜTTNER, FRIEDR. Wilhelm

Studienarbeit: Experimentelle  
Spannungsanalyse an genuteten Wellen mit  
Absätzen mit Hilfe der Spannungsoptik

Jahr: 1983 Betreuer: PERSEKE

KAISER, HORST

Studienarbeit: Entwurf einer Baugruppe  
zur Umsetzung einer Drehbewegung in  
eine rotierende und oszillierende  
Bewegung

Jahr: 1982 Betreuer: SCHNEIDER

KAISER, VOLKER

Diplomarbeit: Literatur aus dem Gebiet der  
Sicherheitstechnik soll nach bestimmten  
Gesichtspunkten aufgesucht, gesichtet und  
geordnet werden

Jahr: 1972 Betreuer: MAYER

KALUSCHE, CHRISTOF

Studienarbeit: Konzeption und partielle  
Realisierung wissensbasierter Moduln zur  
Unterstützung der ergonomiegerechten  
Krankenzustandsgestaltung

Jahr: 1990 Betreuer: GUTBERLET

KÄMMERER, ULRICH

Studienarbeit: Experimentelle Bestimmung  
des Einflusses der Härte des  
Spreizrollenbelags auf das  
Schlupfverhalten des Spreizrollentriebs

Jahr: 1978 Betreuer: MOCKER

KARG, MICHAEL

Studienarbeit: Konstruktive Optimierung  
eines Lichtzeigers

Jahr: 1978 Betreuer: NEUDÖRFER

KARRER, RALF

Studienarbeit: Weiterentwicklung  
bekannter Verfahren zur Herstellung von  
Halbzeugen sowie fertiger Modelle für  
spannungsoptische Untersuchungen

Jahr: 1982 Betreuer: PERSEKE

KATZENBACH, ALFRED

Diplomarbeit: Berechnung und Messung  
der Impedanz von piezokeramischen  
Ultraschallschwingern

Jahr: 1980 Betreuer: UNLAND

KAUFMANN, HEINZ

Studienarbeit: Konstruktion einer  
Längenmeßeinrichtung für  
Stahlgelenkketten  
Jahr: 1983 Betreuer: BINZ

KEILEN, UDO

Studienarbeit: Entwicklung einer  
elektrischen Steuerung für einen  
Kettenprüfstand  
Jahr: 1992 Betreuer: DÖRSAM/KRAUS

KETTELER, HANNS Bernd

Diplomarbeit: Untersuchung des  
Bogentransports in einer Bogen-  
Offsetdruckmaschine  
Jahr: 1990 Betreuer: DÖRSAM

KIEBLING, HOLGER

Diplomarbeit: Konzeptentwicklung für ein  
Dokumentations- und Zugriffssystem für  
technische Mängel  
Jahr: 1989 Betreuer: GUTBERLET

KIND, FRANZ

Studienarbeit: Entwicklung eines  
Kleinschäumgeräts  
Jahr: 1977 Betreuer: MAYER

KIRCHNER, CHRISTOPH

Studienarbeit: Analyse des  
Konstruktionsprozesses im Hinblick auf  
die Problematik Bewerten und Entscheiden  
- Erarbeitung eines  
Unterstützungskonzeptes  
Jahr: 1993 Betreuer: HAIN

KIRSCH, VOLKER

Studienarbeit: Konstruktion von  
Prüfeinrichtungen zur Verschleißprüfung  
an Rollenketten  
Jahr: 1993 Betreuer: KRAUS

KIRST, FLORIAN

Diplomarbeit: Erstellung eines  
Lösungskatalogs für  
Ausgleichskupplungen  
Jahr: 1982 Betreuer: SCHNEIDER

KLEIN, HANS-Ulrich

Studienarbeit: Entwurf einer  
Höhenverstellung für Waschbecken von  
Rückwärtswaschanlagen  
Jahr: 1989 Betreuer: RENNEISEN

KLEMM, EBERHARD

Studienarbeit: Verstellkeilriementrieb mit  
hoher Raumleistung  
Jahr: 1974 Betreuer: LANGER

KLING, THOMAS

Studienarbeit: Spannungsoptische  
Untersuchungen an genuteten Wellen mit  
Wellenabsätzen  
Jahr: 1980 Betreuer: PERSEKE

KLOFE, RÜDIGER

Studienarbeit: Spannungsoptische  
Auswertungen  
Jahr: 1983 Betreuer: PERSEKE/ZANG

KLOSE, FRANK

Studienarbeit: Erstellen eines  
Lösungskatalogs: "Trennende  
Fertigungsverfahren nach DIN 8580"  
Jahr: 1983 Betreuer: BOEHME

KLOTZ, ACHIM

Studienarbeit: Gestaltungsprinzipien für  
Werkstückträger als Teile eines modularen  
Ladungsträger-Konzepts unter  
Berücksichtigung unterschiedlicher  
Transportsysteme  
Jahr: 1989 Betreuer:  
GRÖSSER/GUTBERLET



KNOCH, ALEXANDER

Studienarbeit: Spannungsoptische Untersuchungen an torsionsbelasteten Paßfederverbindungen unter Berücksichtigung des Einflusses der Nabenaußenkontur

Jahr: 1990 Betreuer: RENNEISEN

KOLLEK, JÜRGEN

Studienarbeit: Konstruktion einer Verspannkupplung

Jahr: 1992 Betreuer: KRAUS/DÖRSAM

KÖNIG, HARALD

Studienarbeit: Entwicklung einer Prüfmaschine zur Ermittlung der Dauerfestigkeit von Wellen bei zusammengesetzter Beanspruchung

Jahr: 1974 Betreuer: LÜPERTZ

KONOPKA, DIETMAR

Wissenschaftliche Hausarbeit: Entwicklung und Implementierung eines Konzepts für ein Programm zur Berechnung von zylindrischen Schraubendruckfedern

Jahr: 1993 Betreuer: DÖRSAM

KRAFT, TORSTEN

Diplomarbeit: Entwicklung eines Programms zur Berechnung und Darstellung von kinematischen Größen eines Kettensystems als Teil eines Programmsystems

Jahr: 1992 Betreuer: DÖRSAM

KREBS, JOACHIM

Studienarbeit: Gestaltung von Benutzeroberflächen für technische Informations- und wissensbasierte Systeme unter softwareergonomischen Gesichtspunkten

Jahr: 1990 Betreuer: GUTBERLET

KREITER, WALDEMAR

Studienarbeit: Erstellen einer tabellarischen Lösungssammlung für die Aufgabe "Erzeugen einer Kraft"

Jahr: 1973 Betreuer: EWALD/LÜPERTZ

KROLLMANN, NORBERT

Studienarbeit: Systematischer Katalog für Bedienelemente

Jahr: 1978 Betreuer: NEUDÖRFER

LAMBERTS, FRANK

Studienarbeit: Aufsuchen, Erläutern und Ordnen von Sicherheitsschaltungen

Jahr: 1972 Betreuer: MAYER

LAMBY, MARKUS

Studienarbeit: Zusammenstellung von Methoden zur Lösung kreativer Probleme im Konstruktionsprozeß

Jahr: 1984 Betreuer: GRÖSSER

LANGER, WOLFGANG

Studienarbeit: Entwicklung einer Eichvorrichtung für Absolutschwingungsaufnehmer

Jahr: 1978 Betreuer: VOOS

LAROCHE, STEFAN

Studienarbeit: Umsetzung eines Konzeptes für ein Dokumentations- und Zugriffssystem für technische Mängel

Jahr: 1989 Betreuer: GUTBERLET

LAUBER, PETER

Wissenschaftliche Hausarbeit: Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Spannungsverhältnis und Ausschlagwinkel des Spannrollenträgers in einem selbstspannenden Riementrieb

Jahr: 1974 Betreuer: LANGER

LAUENSTEIN, WOLFGANG

Studienarbeit: Konstruktive Realisierung von Schutzsystemen

Jahr: 1973 Betreuer: MAYER



LAUER, JOHANNES

Studienarbeit: Konzeption und  
Konstruktion eines Druckerzeugers zum  
Einsatz im kosmetischen Bereich  
Jahr: 1992 Betreuer: HAIN

LAUSTER, STEFAN

Studienarbeit: Konstruktion einer  
Prüfmaschine für Umlaufbiegeversuche  
mit überlagerter statischer Torsion  
Jahr: 1990 Betreuer: WEIGAND

LAUTENSCHLÄGER, IMMO

Studienarbeit: Erarbeiten der  
Anforderungen an ein  
Patentinformationssystem aus der Sicht des  
Konstruktors und Erprobung des  
Rechnerprogramms "Pattab"  
Jahr: 1984 Betreuer: VOOS

LAUTH, JÜRGEN

Studienarbeit: Erstellen eines FORTRAN-  
programmes für ein  
Patentinformationssystem auf der Basis  
tabellarischer Lösungssammlungen und  
Erprobung des Programms am Beispiel  
patentierter Lockenstäbe  
Jahr: 1979 Betreuer: VOOS

LEDERER, CHRISTOF

Studienarbeit: Theoretische  
Untersuchungen über die Möglichkeiten  
der Erstellung eines systematisch  
aufgebauten, ergonomischen Zielsystems  
als Hilfsmittel für die konstruktive  
Gestaltung von Arbeitssystemen  
Jahr: 1984 Betreuer: BOEHME

LEHMANN, THOMAS

Studienarbeit: Entwickeln eines  
Prüfstandes zur Abnahme von  
Sicherheitsbindungen nach DIN 7881  
Jahr: 1977 Betreuer: NEUDÖRFER

LEIBOLD, JOSEF

Diplomarbeit: Theoretische Untersuchung  
der Auslegungsverfahren für Rollenketten  
Jahr: 1981 Betreuer: BINZ

LEITER, GERHARD

Studienarbeit: Fragekatalog für Bedienteile  
Jahr: 1980 Betreuer: NEUDÖRFER

LENHART, THOMAS

Studienarbeit: Konstruktion eines  
Kettenprüfstandes  
Jahr: 1980 Betreuer: UNLAND

LESSENICH, LUTZ

Studienarbeit: Untersuchung von  
Epoxydharzen verschiedenen  
Weichmachungsgrades im Hinblick auf  
ihre Eignung als spannungsoptische  
Modellwerkstoffe  
Jahr: 1971 Betreuer: FRAMHEIM/LANGER

LEWE, JÖRG

Studienarbeit: Erstellen einer  
Anforderungsliste für die Entwicklung  
eines Tragesystems für Bildschirmgeräte  
Jahr: 1985 Betreuer: ZANG/ROGLER

LIESSEM, ANDREAS

Diplomarbeit: Informationssystem für  
Handhabungsgeräte / Vergleich  
bestehender Antriebssysteme  
Jahr: 1984 Betreuer: BINZ/SCHNEIDER

LIESSEM, ANDREAS

Studienarbeit: Erstellen einer Sammlung  
von Konstruktionskatalogen  
Jahr: 1982 Betreuer: SCHNEIDER

LIGTENBERG, HARALD

Studienarbeit: Verbesserung vorhandener  
Vorlockerungseinrichtungen zur  
Bogentrennung an einem Bogenanleger  
Jahr: 1991 Betreuer: DÖRSAM

LIPP, KLAUS

Studienarbeit: Konstruktion einer Vorrichtung zur Messung der Verformung eines Bremssattelgehäuses im stationären Verschleißzustand der Bremsbeläge unter statischer Belastung

Jahr: 1985 Betreuer: BOEHME

LIPPHARDT, MICHAEL

Studienarbeit: Konstruktion eines Ultraschallzerstäubers

Jahr: 1979 Betreuer: UNLAND

LISSOWSKI, KLAUS-Peter

Diplomarbeit: Gestaltungsrichtlinien für Urformverfahren (Schmieden, Kaltumformen) und für spanende Verfahren

Jahr: 1969 Betreuer: EWALD/MAYER

LOHAUS, BERND

Studienarbeit: Auswahl verschleißschutzgerechter Werkstoffe und Oberflächenverfahren unter Berücksichtigung metallphysikalischer Werkstoffeigenschaften

Jahr: 1988 Betreuer: PAWLIK

LORENZ, CLAUS

Diplomarbeit: Erstellung und Implementierung eines Konzepts zur Berechnung und Darstellung der Bewegungsungleichmäßigkeiten bei Kettentrieben

Jahr: 1992 Betreuer: DÖRSAM

LOTZ, MATTIAS

Studienarbeit: Konstruktive Optimierung des Kettentransportsystems einer Verpackungsmaschine

Jahr: 1991 Betreuer: DÖRSAM

LUGNER, RÜDIGER

Diplomarbeit: Weiterentwicklung eines Methodeninformationssystems für die Ermittlung von Produktanforderungen

Jahr: 1991 Betreuer: GRÖSSER

MAIER, PETER

Diplomarbeit: Erstellen des Zugriffsteils und Anhangs eines Konstruktionskataloges für hydraulische/pneumatische Pumpen und Motoren

Jahr: 1983 Betreuer: SCHNEIDER

MARUFKE, THOMAS

Studienarbeit: Konstruktion von Prüfeinrichtungen zur Verschleißprüfung an Rollenketten

Jahr: 1993 Betreuer: KRAUS

MAYER, RALPH

Studienarbeit: Konstruktion einer polarisationsoptischen Meßeinrichtung für den Einbau in einen Profilmeßprojektor

Jahr: 1985 Betreuer: ZANG

MENGE, WERNER

Studienarbeit: Optimale Profilgestaltung von Keilriemen

Jahr: 1970 Betreuer: LANGER

MENKE, HENRYK

Diplomarbeit: Zeitabhängig auslösende Sicherheitsskibindungen

Jahr: 1976 Betreuer: NEUDÖRFER

MEYER, LUDWIG

Diplomarbeit: Berücksichtigung der Steifigkeit der Getriebewellen bei der Raumleistungsoptimierung von Flachriemengetrieben

Jahr: 1981 Betreuer: MOCKER

MILEWSKI, RALF

Studienarbeit: Experimentelle Untersuchungen an Hülltrieben

Jahr: 1983 Betreuer: MOCKER

MOCKER, WOLFGANG

Diplomarbeit: Experimentelle Untersuchungen am Spreizrollentrieb

Jahr: 1976 Betreuer: LANGER

MODLER, HANS-WILHELM  
Studienarbeit: Konstruktion des  
momentenmessenden Teiles einer  
Skibindung  
Jahr: 1979 Betreuer: UNLAND

MOMPER, FRIEDRICH  
Studienarbeit: Speicher für ein  
Patentinformationssystem  
Jahr: 1979 Betreuer: VOOS

MOST, EGBERT  
Diplomarbeit: Theoretische Vorarbeiten zu  
einer Maschinenelemente-  
Programmsammlung  
Jahr: 1982 Betreuer: BINZ

MUHL, WERNER  
Studienarbeit: Entwicklung einer Baureihe  
von Spreizrollentrieben mittels EDV  
Jahr: 1977 Betreuer: MOCKER

MÜHLBEYER, H.  
Studienarbeit: Erstellen eines Katalogs für  
die Aufgabe "Erzeugen einer Kraft"  
Jahr: 1971 Betreuer: LÜPERTZ

MÜLLER, BERND  
Diplomarbeit: Systematische  
Zusammenstellung und Weiterentwicklung  
von Hilfsmitteln für  
Informationsbedarfsanalyse und  
Wissensakquisition  
Jahr: 1989 Betreuer: GUTBERLET

MÜLLER, RALF  
Studienarbeit: Eingabe von Wissen und  
Erprobung eines bestehenden  
Informationssystems im  
Konstruktionsbereich für Wälzlager unter  
besonderer Berücksichtigung der  
Laufgeräusche  
Jahr: 1987 Betreuer: ROGNER

MÜLLER, KLAUS-WERNER  
Studienarbeit: Aufbau eines  
Datenbanksystems zum Zwecke der  
Vermeidung konstruktiv verursachter  
Schwachstellen an technischen Produkten  
und Systemen  
Jahr: 1989 Betreuer: GUTBERLET

MÜLLER, HEIKO  
Studienarbeit: Konstruktive Umsetzung  
des Prinzips der "Simulated Moving Bed  
Chromatographie (SMB)"  
Jahr: 1993 Betreuer: HAIN

NEEF-MÖLLER, MONIKA  
Studienarbeit: Einsatzmöglichkeiten von  
Expertensystemen bei der korrektiven und  
konzeptiven Produkt- und  
Systemgestaltung  
Jahr: 1987 Betreuer: GUTBERLET

NEHL, EBERHARD  
Studienarbeit: Messung und Auswertung  
der Tropfenspektren von Sprühstrahlen  
Jahr: 1979 Betreuer: UNLAND

NEUDÖRFER, ALFRED  
Studienarbeit: Entwicklung und Erprobung  
eines kleinen Riemenprüfstandes  
Jahr: 1971 Betreuer: LANGER

NEUGEBAUER, JÜRGEN  
Studienarbeit: Gegenüberstellung dreier  
Möglichkeiten zur Krafterzeugung  
Jahr: 1975 Betreuer: LANGER

OEDEKOVEN, ALBRECHT  
Studienarbeit: Winkelsteife  
Verbindungsstellen von biegesteifen, aber  
torsionsweichen Profilen mit biege- und  
torsionssteifen Profilen  
Jahr: 1982 Betreuer: ZANG

OEHL, HANS-WALTER

Studienarbeit: Entwurf eines Prüfstandes zur Messung der Kenngrößen von Pumpen für kleine Flüssigkeitsmengen  
Jahr: 1977 Betreuer: UNLAND

OLDENDORF, ULRICH

Studienarbeit: Vergleichende Untersuchung der Spannungsanalyse an Kerbstäben mit Hilfe der Spannungsoptik und der Methode der Finiten Elemente  
Jahr: 1990 Betreuer: RENNEISEN

OSWALD, THOMAS

Studienarbeit: Entwicklung eines Konzepts zur rechnerunterstützten Berechnung von Maschinenelementen und Implementierung eines existierenden Programms zur Schraubenberechnung  
Jahr: 1993 Betreuer: DÖRSAM/HAIN

PAWLENKA, ANDREAS

Studienarbeit: Systematische Entwicklung und konstruktive Gestaltung einer Vorrichtung zur Aufnahme des Fußes beim Skilaufen, insbesondere unter Berücksichtigung der Kinematik des Sprunggelenkes  
Jahr: 1981 Betreuer: VOOS

PAWLIK, CHRISTIAN

Diplomarbeit: Einfluß der Verbindungslänge auf die Wellenbeanspruchung in einer Paßfederverbindung  
Jahr: 1984 Betreuer: ZANG

PEETZ, JÜRGEN

Studienarbeit: Erstellen eines Konstruktionskataloges für Steuerstände unter Berücksichtigung ergonomischer Erkenntnisse  
Jahr: 1984 Betreuer: BOEHME

PEMSEL, THOMAS

Studienarbeit: Optimierung einer konstruktiven Mehrfachkerbe am Maschinenelement Welle  
Jahr: 1983 Betreuer: PERSEKE

PERSEKE, WINFRIED

Studienarbeit: Erstellung eines mechanischen Ersatzmodells für Kopplungsschwinger, bestehend aus einem aktiven Piezokeramikschwinger sowie dessen Berechnung  
Jahr: 1978 Betreuer: UNLAND

PETERS, WOLFGANG

Studienarbeit: Konstruktion einer Kettenschutz- und Schmierungsvorrichtung  
Jahr: 1982 Betreuer: BINZ

PFAU, JOCHEN

Studienarbeit: Rechnerunterstützung in der Konstruktion - Auswertung einer Umfrage unter deutschen Maschinenbauunternehmen  
Jahr: 1990 Betreuer: GRÖSSER

PFEIFER, THOMAS

Studienarbeit: Bedienbarkeit von Maschinensystemen  
Jahr: 1978 Betreuer: NEUDÖRFER

PFEIFFER, THOMAS

Studienarbeit: Experimentelle Untersuchung des Bogentransports mit Ketten in einer Offsetdruckmaschine  
Jahr: 1992 Betreuer: DÖRSAM

PFENNING, MICHAEL

Studienarbeit: Implementierung eines bestehenden Informationskonzeptes auf einem IBM-Microcomputer  
Jahr: 1986 Betreuer: ROGLER

PODACK, ASTRID  
 Studienarbeit: Erstellung eines  
 Ordnungssystems für Industrie-  
 Sondergetriebe eines Getriebeherstellers  
 Jahr: 1992 Betreuer: GRÖSSER

POHL, REINHOLD  
 Studienarbeit: Schadensfälle druch  
 Bedienungsfehler  
 Jahr: 1979 Betreuer: NEUDÖRFER

PONS, HARALD  
 Studienarbeit: Weiterentwicklung eines  
 Prüfstandes zur Untersuchung der  
 Dauerhaltbarkeit von Welle-Nabe-  
 Verbindungen für Belastungen mit  
 Umlaufbiegung und statischer Torsion  
 Jahr: 1992 Betreuer: GÜNTHER

PREUSSER, GERDA  
 Studienarbeit: Finden neuer Lösungen für  
 Mehrebenen-Bindungen  
 Jahr: 1977 Betreuer: VOOS/NEUDÖRFER

PREUSSER, TIMM  
 Studienarbeit: Finden neuer Lösungen für  
 Plattenbindungen  
 Jahr: 1977 Betreuer: VOOS/NEUDÖRFER

PUMM-SCHUBERT, Christfried  
 Wissenschaftliche Hausarbeit:  
 Formzahlbestimmung für Paßfedernuten  
 unter Biegebeanspruchung  
 Jahr: 1985 Betreuer: PROF. RAAB/ZANG

RABOLD, KLAUS  
 Studienarbeit: Konstruktion einer  
 Zusatzvorrichtung zu einer Zug-Druck-  
 Prüfmaschine zur Erzeugung einer reinen  
 Torsionsbelastung  
 Jahr: 1984 Betreuer: ZANG

RACHOR, NORBERT  
 Studienarbeit: Spannungsoptische  
 Untersuchungen an räumlichen  
 Paßfederverbindungen  
 Jahr: 1984 Betreuer: ZANG

RAMNIALIS, CHRISTOS  
 Diplomarbeit: Spannungsoptische  
 Untersuchungen an Paßfederverbindungen  
 unter Biegebelastung  
 Jahr: 1990 Betreuer: WEIGAND

RATHMANN, DIETHARD  
 Diplomarbeit: Konstruktionsprinzipien von  
 Schutzsystemen  
 Jahr: 1972 Betreuer: MAYER

REGNER, STEFAN  
 Studienarbeit: Entwicklung von zeit- und  
 kostensparenden Verfahren zur Herstellung  
 von Halbzeugen und Modellen für  
 spannungsoptische Untersuchungen  
 Jahr: 1981 Betreuer: PERSEKE

REH, STEFAN  
 Studienarbeit: Erstellung von Programmen  
 zur Berechnung von Wälzlagern sowie  
 hydrodynamischer Radiallager  
 Jahr: 1987 Betreuer: PAWLIK

REICH, GERHARD  
 Studienarbeit: Entwurf einer  
 Belastungsvorrichtung für verschiedene  
 ebene spannungsoptische Untersuchungen  
 Jahr: 1981 Betreuer: PERSEKE

REICHELT, HELMUT  
 Diplomarbeit: Analyse der Organisation  
 und Arbeitsweise von Patentabteilungen  
 mit Hilfe einer Firmenenumfrage  
 Jahr: 1978 Betreuer: VOOS

REIFFERSCHIED, ELKE  
 Studienarbeit: Erstellung von Programmen  
 zur Berechnung von Zahnrädern und  
 Wellen/Trägern  
 Jahr: 1985 Betreuer: BINZ

REITER, ULRICH  
 Studienarbeit: Testen einer neuen  
 Darstellungsart - Durchführung der Tests  
 Jahr: 1974 Betreuer: LÜPERTZ

REMMERT, THOMAS

Wissenschaftliche Hausarbeit:  
Konstruktion eines Kettenprüfstandes nach  
dem Achsenverspannprinzip  
Jahr: 1992 Betreuer: DÖRSAM/KRAUS

RENNEISEN, ARMIN

Diplomarbeit: Spannungsoptische  
Untersuchungen an genuteten Wellen unter  
Biegebelastung  
Jahr: 1987 Betreuer: WEIGAND

REUTER, MATTHIAS

Diplomarbeit: Entwicklung einer Methode  
zur Unterstützung des  
Konstruktionsprozesses bei  
Variantenkonstruktionen: Bestimmung  
eines Optimums zwischen den beiden  
konkurrierenden Anforderungen  
kundengerechtes und kostengünstiges  
Konstruieren  
Jahr: 1993 Betreuer: FABRIG

RIECKHOFF, KURT

Diplomarbeit: Messung des örtlichen  
Schlupfes (eines Flachriemens)  
Jahr: 1976 Betreuer: LANGER

ROGLER, ERNST

Studienarbeit: Konstruktive Maßnahmen  
zur Verbesserung des dynamischen  
Verhaltens von  
Skibindungsfernenautomaten  
Jahr: 1981 Betreuer: VOOS

ROMMEL, KLAUS

Studienarbeit: Konstruktiver Entwurf eines  
Zeichenmaschinenarbeitsplatzes  
Jahr: 1984 Betreuer: BOEHME/DR.  
MAINZER

ROOS, MANFRED

Diplomarbeit: Untersuchungen über den  
Kraftfluß und seine Einflußparameter bei  
der energetischen Wechselwirkung  
zwischen der Arbeitsperson und dem  
technischen System  
Jahr: 1983 Betreuer: BOEHME

ROSSMANN, GÜNTER

Studienarbeit: Entwerfen im Maschinen-  
und Gerätebau mit Hilfe von numerisch  
gesteuerten Zeichenautomaten bei  
symbolhafter Darstellung standardisierter  
Bauelemente  
Jahr: 1972 Betreuer: LÜPERTZ

ROTTLER, PETER

Studienarbeit: Erarbeiten von Hilfsmitteln  
für die systematische Variation beim  
Konstruieren  
Jahr: 1970 Betreuer: EWALD

RUDOLF, FERDINAND

Studienarbeit: Ermittlung innerer  
Beanspruchungen im Flachriemen  
Jahr: 1974 Betreuer: LANGER

RUPPEL, JÜRGEN

Diplomarbeit: Erstellen eines  
Konstruktionskataloges für ruhende  
Berührungsdichtungen  
Jahr: 1984 Betreuer: ROGLER

SCHAFFRATH, HEINZ-JOACHIM

Studienarbeit: Konstruktion eines  
Kettenprüfstandes  
Jahr: 1987 Betreuer: PAWLIK

SCHERER, THOMAS

Studienarbeit: Räumliche  
spannungsoptische Untersuchungen an  
Paßfederverbindungen  
Jahr: 1985 Betreuer: ZANG

SCHILDGE, BERND

Diplomarbeit: Erstellen eines systematisch aufgebauten ergonomischen Zielsystems zur Unterstützung des Konstrukteurs in verschiedenen Phasen des methodischen Konstruktionsprozesses

Jahr: 1984 Betreuer: BOEHME

SCHLAGAU, SIEGMAR

Studienarbeit: Systematische Untersuchung bestehender Patentinformationsdienste und Patentinformationssysteme, ihrer Leistungen und ihrer Arbeitsweise

Jahr: 1982 Betreuer: VOOS

SCHMAHL, WILFRIED

Diplomarbeit: Spannungsoptische Untersuchungen von

Mehrfachkerbwirkungen an Wellen

Jahr: 1981 Betreuer: PERSEKE

SCHMITTNER, BERNHARD

Diplomarbeit: Optische Verfahren in der experimentellen Spannungsanalyse

Jahr: 1984 Betreuer: ZANG

SCHNEIDER, JÜRGEN

Studienarbeit: Entwurf eines Universal-Bodentürschlißers mit gedämpfter Schließbewegung

Jahr: 1978 Betreuer: UNLAND

SCHOLZ, THORSTEN

Diplomarbeit: Spannungsoptische Untersuchung einer biegebelasteten Paßfederverbindung

Jahr: 1988 Betreuer: WEIGAND

SCHÖNEBERG, GERD

Studienarbeit: Erarbeiten von Hilfsmitteln für das systematische Variieren beim Entwerfen

Jahr: 1971 Betreuer: EWALD

SCHRADER, WOLFGANG

Studienarbeit: Parametrische Untersuchung eines selbstspannenden Riementriebs mit Leistungsverzweigung

Jahr: 1976 Betreuer: LANGER

SCHRADER, HOLGER

Studienarbeit: Untersuchung und Weiterentwicklung eines Hubgetriebes

Jahr: 1993 Betreuer: KRAUS

SCHREIVOGEL, FRANK

Diplomarbeit: Weiterentwicklung eines Modells zur Beschreibung der Kinematik von Rollen-Kettensystemen

Jahr: 1993 Betreuer: DÖRSAM

SCHÜLER, FLORIAN

Diplomarbeit: Übersicht und krit.

Bemerkungen über die z. Zt.

gebräuchlichen und diskutierten

Beurteilungsmaßstäbe in nat. und internat.

Richtlinien, technischen Empfehlungen

und Normen über

Stoßverträglichkeitsgrenzen des Menschen

Jahr: 1978 Betreuer: VOOS

SCHULZE, HEIKO

Studienarbeit: Implementierung eines rechnergestützten Analyse- und Dokumentationssystems für die Ermittlung von Produktanforderungen

Jahr: 1992 Betreuer: GRÖSSER

SCHULZE-DIECKHOFF, RUDOLF

Diplomarbeit: Stand und zukünftige Entwicklung des Rechnereinsatzes in Konstruktionsabteilungen deutscher Maschinenbau-Unternehmen

Jahr: 1989 Betreuer: GRÖSSER

SCHÜTZ, GEORG

Studienarbeit: Selbstspannender Riementrieb mit Leistungsverzweigung

Jahr: 1974 Betreuer: LANGER



SCHÜTZ, CHRISTOPH

Studienarbeit: Zugmittelgetriebe - eine vergleichende Untersuchung zur Anwendung in der Fördertechnik  
Jahr: 1991 Betreuer: DÖRSAM

SCHWAB, WOLFGANG

Studienarbeit: Erstellen eines Fortranprogrammes für ein Patentinformationssystem und Erprobung des Programms am Beispiel patentierter Lockenstäbe (Teil 2)  
Jahr: 1979 Betreuer: VOOS

SCHWALBE, HANS-Joachim

Studienarbeit: Wirkliche durch die Betriebskraft entstehende Zusatzbelastung vorgespannter Schrauben  
Jahr: 1972 Betreuer: LANGER

SEEBERGER, ACHIM

Diplomarbeit: Entwicklung eines wissensbasierten Systems zur Rechnerunterstützung des Konstruktionsprozesses bei der Suche, Kombination und Bewertung von Wirkprinzipien - Konzepterstellung und Teilimplementierung  
Jahr: 1993 Betreuer: HAIN/FABRIG

SEEHAUS, OTTO

Diplomarbeit: Zusammenstellen von Hinweisen für das fertigungsgerechte Gestalten  
Jahr: 1968 Betreuer: EWALD

SIMON, GÜNTHER

Studienarbeit: Übersetzungsverhältnis Bedienelement-Anzeigeelement  
Jahr: 1978 Betreuer: NEUDÖRFER

SINKINS, MICHAEL

Studienarbeit: Entwicklung und Realisierung einer Programmstruktur als Teil eines Programmsystems zur kinematischen Analyse eines Ketten-Greiferwagensystems  
Jahr: 1992 Betreuer: DÖRSAM

SITZMANN, BERND

Studienarbeit: Konstruktion von Prüfeinrichtungen zur Verschleißprüfung an Rollketten  
Jahr: 1992 Betreuer: KRAUS

SKOPIK, MARIO

Studienarbeit: Programm zur Durchführung von Festigkeitsberechnungen aus dem Maschinenbau  
Jahr: 1987 Betreuer: WEIGAND

SLEDZIEJOWSKI, THOMAS

Studienarbeit: Konstruktion eines multivariaten Ergometers  
Jahr: 1976 Betreuer: KRELL

SLEDZIEJOWSKI, THOMAS

Studienarbeit: Systematische Untersuchung patentierter auslösender Fersenhalter von Sicherheitsskibindungen  
Jahr: 1976 Betreuer: NEUDÖRFER

SÖHNE, HELMUT

Diplomarbeit: Erstellen einer allgemeingültigen ergonomiebezogenen Anforderungsliste für die anthropometrische Arbeitssystemgestaltung  
Jahr: 1984 Betreuer: BOEHME

SPITZENPFEIL, THOMAS

Studienarbeit: Systematische Darstellung von Einflußfaktoren der äußeren Formgebung von Industrieprodukten  
Jahr: 1988 Betreuer: GRÖSSER



STABEL, NORBERT

Studienarbeit: Systematische Erfassung arbeitswissenschaftlicher Verfahren zur Beanspruchungsermittlung bei Arbeitspersonen als Ausgangsbasis für die ergonomische Bewertung von Konstruktionen

Jahr: 1984 Betreuer: BOEHME

STAMM, WOLFGANG

Studienarbeit: Stoßverträglichkeitsgrenzen des Skifahrers

Jahr: 1978 Betreuer: MEIER-DÖRNBERG/VOOS

STÄNDER, WILFRIED

Studienarbeit: Ebene FEM-Untersuchungen an konstruktiven Mehrfachkerben an Wellen

Jahr: 1983 Betreuer: PERSEKE

STANZEL, BERTHOLD

Studienarbeit: Erstellung eines Programms zur Berechnung von zylindrischen Schraubendruckfedern

Jahr: 1985 Betreuer: BINZ

STECHHAN, MATTHIAS

Studienarbeit: Erstellen eines Konstruktionskataloges für ergonomische Gestaltungsregeln für Anzeiger und Bedienteile

Jahr: 1984 Betreuer: BOEHME

STEIMEL, JOHANNES

Studienarbeit: Erprobung einer Systematik für die Aufgabe Weg-Feineinstellung

Jahr: 1972 Betreuer: EWALD

STEIN, OLIVER

Studienarbeit: Konzeption und konstruktive Realisierung eines Drehmomentaufnehmers unter Berücksichtigung situationsspezifischer Einflußfaktoren

Jahr: 1991 Betreuer: HAIN/GÜNTHER

STEINBERG, CHRISTOPH

Studienarbeit: Zusatzvorrichtung zur spannungsoptischen Untersuchung eingefrorener Spannungszustände in Epoxidharzmodellen

Jahr: 1980 Betreuer: PERSEKE

STEINMÜLLER, WERNER

Studienarbeit: Erstellung eines Informationssystems für geschützte Ultraschallzerstäuber

Jahr: 1978 Betreuer: UNLAND

STENGER, RALPH

Studienarbeit: Modellierung und Berechnung ausgewählter Schraubenverbindungstypen mit Hilfe eines FE-Programms mit dem Ziel der Überprüfung von Annahmen der VDI-Richtlinie zur Berechnung von Schraubenverbindungen (VDI 2230)

Jahr: 1993 Betreuer: HAIN/OLDENDORF

STIERLE, FRANK

Studienarbeit: Entwurf einer Haltevorrichtung für medizinische und optische Geräte

Jahr: 1982 Betreuer: ZANG

STOODT, TILMANN

Wissenschaftliche Hausarbeit: Erstellung eines Lösungskataloges für schaltbare Kupplungen

Jahr: 1982 Betreuer: PROF. RAAB/SCHNEIDER

STORANDT, RALF

Studienarbeit: Entwicklung einer Schuhbefestigung an einer Sohlenplatte für Skibindungen

Jahr: 1976 Betreuer: EWALD

STRUVE, DIRK

Studienarbeit: Herstellung eines endlosen Flachriemens aus weichgemachtem Epoxidharz

Jahr: 1973 Betreuer: LANGER

THEINL, HUBERT

Diplomarbeit: Einfluß der Belastungshöhe auf die Größen E-Modul (E) und spannungsoptische Konstante (S) bei verschiedenen, zum Teil weichgemachten Epoxidharzen

Jahr: 1976 Betreuer: LANGER

THIES, KLAUS-PETER

Studienarbeit: Beanspruchungsverhältnisse im Riemen

Jahr: 1971 Betreuer: LANGER

TOMASCHEK, PETER

Studienarbeit: Erstellen einer tabellarischen Lösungssammlung für eine beim Konstruieren oft wiederkehrende Teilaufgabe

Jahr: 1974 Betreuer: EWALD

TÖNSMANN, ARMIN

Studienarbeit: Auslösender Fersenhalter für Tourenplattenbindungen

Jahr: 1976 Betreuer: NEUDÖRFER

UNLAND, GEORG

Diplomarbeit: Entwicklung eines Kleinsprüngerätes

Jahr: 1976 Betreuer: MAYER

UNLAND, HERMANN

Studienarbeit: Produktplanung und Produktabwicklung einer Neuentwicklung eines Türschließsystems

Jahr: 1980 Betreuer: UNLAND/PERSEKE

VIERHEILIG, LOTHAR

Studienarbeit: Konstruktion eines Simulationsprüfstandes zur Untersuchung von Rollenket tengliedern

Jahr: 1981 Betreuer: BINZ

VÖLKEL, WOLFGANG

Studienarbeit: Konstruktiver Entwurf eines Reibrad-Planeten-Getriebes

Jahr: 1973 Betreuer: LANGER

VOOS, WOLFGANG

Diplomarbeit: Systematische Untersuchung patentierter auslösender Vorderbacken von Sicherheitsskibindungen

Jahr: 1976 Betreuer: NEUDÖRFER

WAGNER, WOLFGANG

Diplomarbeit: Überprüfen und Eichen eines Versuchsstandes und Ermittlung erster Meßwerte (mit Genauigkeitsangabe)

Jahr: 1972 Betreuer: LANGER

WALL, HANS-JÜRGEN

Studienarbeit: Umfrage zur Konstruktionsmethodik

Jahr: 1973 Betreuer: EWALD

WALLUF, HANS-PETER

Studienarbeit: Speichermittel und -methoden für ein Patentinformationssystem auf der Basis tabellarischer Lösungssammlungen

Jahr: 1983 Betreuer: VOOS

WEIGAND, MICHAEL

Studienarbeit: Rechenprogramme zur Durchführung des

Schubspannungsdifferenzenverfahrens

Jahr: 1985 Betreuer: ZANG/BINZ

WEIGEL, DIETMAR

Diplomarbeit: Wirkungsgradmessungen an Hülltrieben

Jahr: 1980 Betreuer: MOCKER

WEIGERT, THOMAS

Studienarbeit: Realisierung eines wissensbasierten Systems zur Unterstützung von Selektionsprozessen in der Konstruktion

Jahr: 1988 Betreuer: GUTBERLET

WEILER, THOMAS

Studienarbeit: Entwurf eines Wandarmes zur Aufnahme friseurtechnischer, medizinischer und photographischer Geräte

Jahr: 1978 Betreuer: UNLAND

WEINGARTEN, ULRICH

Studienarbeit: Aufbau eines  
wissensbasierten Systems zur  
Unterstützung der Gestaltung der optischen  
Informationsaufnahme in Arbeitssystemen  
Jahr: 1988 Betreuer: GUTBERLET

WEIS, ARMIN

Diplomarbeit: Rechneinsatz bei der  
Suche nach Lösungsvarianten beim  
Konstruieren  
Jahr: 1972 Betreuer: EWALD

WEISS, JÜRGEN

Studienarbeit: Analyse des Tribosystems  
"Rollenkettengelenk"  
Jahr: 1984 Betreuer: BINZ

WERNER, KLAUS

Studienarbeit: Optimierung eines  
wissensbasierten Systems zur  
Unterstützung der Ermittlung  
ergonomischer Anforderungen und  
potentieller Schwachstellen  
Jahr: 1989 Betreuer: GUTBERLET

WEYER, MICHAEL

Studienarbeit: Auswahl von  
Verschleißschutzschichten  
Jahr: 1989 Betreuer: PAWLK

WIEN, WOLFGANG

Studienarbeit: Weiterentwicklung eines  
Bodenstativs  
Jahr: 1985 Betreuer: ROGLER

WIETEK, SABINE

Studienarbeit: Entwicklung einer  
Prüfeinrichtung zur Untersuchung von  
Rollenketten mit Kettenführungen  
Jahr: 1992 Betreuer: DÖRSAM

WINK, MATTHIAS

Studienarbeit: Zusammenstellung und  
Messung der Sprühstrahlkenngrößen von  
Ultraschallzerstäubern  
Jahr: 1978 Betreuer: UNLAND

WINKLE, ARMIN

Studienarbeit: Einsatz von Flüssigkristallen  
im Bereich der Maschinenelemente  
Jahr: 1990 Betreuer: GRÖSSER

WITTING, JÜRGEN

Studienarbeit: Erstellung von  
Auswahlkriterien für Zugmittelgetriebe  
Jahr: 1987 Betreuer: PAWLK

WOEBCKEN, CARL

Studienarbeit: Entwurf einer  
Steinschneidmaschine  
Jahr: 1980 Betreuer: UNLAND

WOLZ, NORBERT

Studienarbeit: Untersuchungen an der  
Mehrfachkerbe Paßfedernut-Wellenabsatz  
Jahr: 1985 Betreuer: ZANG

ZANG, RUPERT

Studienarbeit: Konstruktion einer  
Glasbeschichtungsvorrichtung  
Jahr: 1980 Betreuer: UNLAND

ZECH, STEPHAN

Studienarbeit: Konstruktionskatalog  
elektrischer Kleinmotoren  
Jahr: 1983 Betreuer: SCHNEIDER

ZELTNER, JÜRGEN

Studienarbeit: Analyse und Vergleich  
bekannter Berechnungsverfahren für  
ruhende Berührungsdichtungen  
Jahr: 1986 Betreuer: ROGLER

ZIEGLER, RALF

Diplomarbeit: Erarbeitung konstruktiver  
Möglichkeiten zur Erhöhung der  
Steifigkeit von Kunststoff-Flaschen mit  
dem Ziel der Gewichtsreduzierung  
Jahr: 1993 Betreuer: OLDENDORF

ZOBEL, RÜDIGER

Diplomarbeit: Räumliche  
spannungsoptische Untersuchungen zur  
Überprüfung der Beanspruchungen in einer  
durch Biegung belasteten ebenen Platte

Jahr: 1992    Betreuer: GÜNTHER